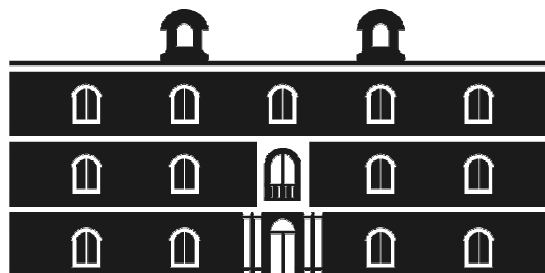




Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



**industriales**  
etsii UPCT

# **Estudio del transporte neumático de biomasa en tubos con rascadores alternativos**

**Titulación:** INGENIERO TÉCNICO  
INDUSTRIAL, ESP. QUÍMICA  
INDUSTRIAL

**Intensificación:** PROCESOS QUÍMICOS

**Alumno/a:** ANTONIO SÁNCHEZ CARRILLO

**Director/a/s:** JUAN PEDRO SOLANO  
FERNÁNDEZ

RUTH HERRERO MARTÍN

Cartagena, 25 de Septiembre de 2013

**ÍNDICE:**

1.	Introducción	6
2.	Revisión bibliográfica	8
2.1.	Tecnología actual para el procesamiento de biomasa	11
2.1.1	Pirolisis	11
2.2.	Descomposición de la biomasa asistida con microondas	12
2.3.	Flujo continuo de sólidos en un reactor tubular	13
2.3.1	Transporte neumático	14
2.3.2	Alimentación con tornillo sin fin	14
2.3.3	Mecanismo de agitación	16
2.4.	Rascador con movimiento alternativo	17
2.5.	Modelado de flujo de biomasa sólida con reactores tubulares	18
3.	Trabajo experimental	19
3.1.	Variables experimentales	19
3.1.1	Caudal de aire	19
3.1.2	Concentración de biomasa	19
3.1.3	Velocidad del rascador	19
3.1.4	Tipo de biomasa	19
3.1.4.1	Biomasa en forma de pellets de madera	19
3.1.4.2	Biomasa en forma de paja molida	20
3.1.5	Tamaño del reactor	20
3.2.	Equipo experimental	20
3.2.1	Tolva de alimentación	21
3.2.2	Válvula de alimentación de biomasa	22
3.2.3	Pistón hidráulico	22
3.2.4	Reactor tubular	23
3.2.4.1	Conexión de la tubería de alimentación de biomasa y el pistón	24

---

3.2.4.2	Conexión del depósito	24
3.2.5	Rascador con movimiento alternativo	24
3.2.6	Compresor de aire	25
3.2.7	Medidor de caudal	26
3.2.8	Válvula de flujo de aire	27
3.2.9	Cámara de alta velocidad	27
3.2.10	Instrumentación	29
3.2.10.1	Termopares	29
3.2.10.2	Sensor de presión en la entrada de aire	29
3.2.10.3	Sensor de presión en el pistón	29
3.3.	Medidas experimentales	30
3.3.1	Número de Reynolds	30
3.3.2	Número de Stokes	31
3.3.3	Consumo de energía	32
3.3.4	Emisiones equivalentes de CO <sub>2</sub>	34
3.4.	Condiciones experimentales	34
3.4.1	Biomasa en forma de pellets de madera	34
3.4.2	Biomasa en forma de paja molida	35
3.4.3	Cambios en el pistón	35
3.4.4	Rotación del rascador	35
4.	Resultados experimentales y comentarios	36
4.1.	Número de Reynolds	36
4.2.	Características del flujo	36
4.2.1	Biomasa como pellets de madera	36
4.2.2	Biomasa en forma de paja molida	40
4.2.2.1	Variación en el tubo de reacción	43
4.3.	Caudal de biomasa	43

---

---

4.3.1	Pellets de biomasa	43
4.3.2	Biomasa en forma de paja molida	46
4.3.3	Fase de biomasa acumulada en el fondo del reactor	47
4.4.	Concentración de biomasa	50
4.5.	Velocidad del rascador	52
4.5.1	Biomasa: pellets de madera	53
4.5.1.1	Movimiento a favor de corriente	55
4.5.1.2	Movimiento a contracorriente	55
4.5.2	Biomasa en forma de paja molida	56
4.5.3	Rotación del rascador	57
4.6.	Número de Stokes	58
4.7.	Consumo energético.	61
4.7.1	Biomasa en forma de pellets de madera.	61
4.7.1.1	Energía consumida por el rascador	63
4.7.2	Paja molida:	65
4.7.2.1	Consumo energético del rascador	65
4.8.	Emisiones equivalentes de CO <sub>2</sub>	66
4.9.	Condiciones óptimas	69
4.10.	Limitaciones de los ensayos	69
5.	Modelado de flujo	70
5.1.	Geometría y malla	70
5.1.1	Reactor tubular sin rascador	70
5.1.2	Reactor tubular con rascador en su interior	70
5.2.	Tipo de modelo	71
5.3.	Resultados	72
5.3.1	Tubo liso	72
5.3.1.1	Aire	72

---



5.3.1.2	Pellets de madera	72
5.3.1.3	Paja molida	73
5.3.2	Rascador inmóvil	74
5.3.2.1	Aire	74
5.3.2.2	Pellets de madera	75
5.3.2.3	Paja molida	77
6.	Conclusiones	79
7.	Recomendaciones para futuros trabajos	81
8.	Referencias	84

## 1. Introducción

La creciente necesidad de reemplazar los combustibles fósiles por otro tipo de combustibles más respetuosos con el medio ambiente y el empeño en disminuir la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero han motivado que se lleven a cabo investigaciones para producir combustibles alternativos. Las actuales reservas de combustibles fósiles no serán suficientes para soportar la creciente demanda del mundo desarrollado. Clark (2007) sugiere que en particular la industria, y en especial la industria química necesita responder a esos desafíos.

Uno de los caminos más importantes para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera es el uso de fuentes sostenibles de carbón para producir biocarburantes, esto ayudará a disminuir el uso de combustibles fósiles. Andrews y Jelley (2007) sugieren que la biomasa representa una fuente renovable de combustibles basados en el carbón.

Los biocombustibles, pueden ser usados para reemplazar combustibles fósiles, se pueden obtener a partir de la pirolisis de biomasa. Una de las grandes ventajas de los biocombustibles sobre los combustibles fósiles es que su método de producción tiene un balance neutro de carbono. Esto quiere decir que la cantidad de dióxido de carbono liberada durante el proceso de pirolisis ha sido previamente eliminada de la atmósfera. Esta eliminación se produce mediante el proceso de fotosíntesis que realiza la planta durante su crecimiento. Por lo tanto, la biomasa es una fuente sostenible de carbón con una producción neta de dióxido de carbono. Sin embargo, hay que reconocer que esto sólo es así si la biomasa consumida se renueva.

Hay muchas razones por las cuales el interés en la producción de biocombustibles a partir de biomasa se ha incrementado en los últimos años:

La naturaleza renovable de la biomasa.

Su relativa abundancia. (Cui y Grace, 2006).

Fácil de almacenar (Wang et al., 2011).

Fácil de transportar (Zhang et al., 2011).

El incremento en el precio de los productos de alimentación ha originado que se preste mas atención al uso de la biomasa para producir energía y se deje un poco de lado el uso del maíz, la soja y otros cereales para producir bioetanol y biodiesel (Wan et al., 2009)

La dependencia de la importación de petróleo disminuirá debido al uso de biocombustibles (Ningam and Singh, 2011).

La conversión de biomasa sólida produce dos tipos de combustibles, uno sólido semicoque también conocido como char y un biocombustible (líquido). El sólido (semicoque) tiene propiedades similares al carbón. El líquido (biocombustible) tiene propiedades superiores a las de otros combustibles producidos por métodos convencionales.

Wang et. al, (2008) explican que la descomposición por medio de microondas de biomasa sólida es un ruta prometedora hacia la obtención de biocombustibles, una fuente de energía novedosa y eficiente. La mayor parte del trabajo previo que se ha realizado sobre la descomposición por microondas de biomasa sólida ha tenido lugar en reactores convencionales de forma discontinua. El proceso en discontinuo es aceptable para una producción a pequeña escala, sin embargo, es necesario investigar nuevas tecnologías para establecer un proceso en continuo para ser capaces de obtener una producción a escala comercial.

El estudio que se esta llevando a cabo, para la investigación de la descomposición de biomasa sólida asistida con microondas, entre la Universidad de Newcastle, Universidad de York y la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), va encaminado a desarrollar un método de producción en continuo de biocombustibles. Zhang et al. (2011) identificaron un grave inconveniente, la incapacidad de alimentar la biomasa al reactor de forma continua y uniforme.

Este proyecto que servirá de base para futuros estudios, investigará métodos para el transporte continuo de biomasa hacia el reactor tubular diseñado, el transporte neumático será investigado al detalle para obtener la idoneidad para esta aplicación. El trabajo experimental usa dos tipos de biomasa que nos darán principalmente resultados cualitativos en forma de fotografías que permitirán la investigación de los patrones de flujo mostrados por la biomasa. En suma, estudios de modelado de dinámica de fluidos nos darán comparaciones y conocimientos más profundos.

Una de las principales ventajas de la producción de biocombustibles sobre los combustibles fósiles convencionales es el balance de carbono neutro. Un estudio más a fondo de los datos experimentales permitirá conocer el consumo de energía del proceso y las emisiones de dióxido de carbono asociadas a él para ser evaluadas.

## 2. Revisión bibliográfica

La necesidad de fuentes de energía renovable para reemplazar los combustibles fósiles ha supuesto un incremento en la cantidad de investigaciones para usar la biomasa para este fin. El término “Biomasa” a menudo suele significar material a base de plantas en el contexto de la producción de energía, es un material biológico que deriva de organismos vivos (Biomass Energy Centre 2010).

Calle et al. (2007), aseguran que la biomasa es, potencialmente, la mayor fuente de energía sostenible que el mundo nos ha ofrecido. La energía calorífica se puede producir directamente, a partir de biocombustibles, por generación de electricidad, o puede ser procesada para producir bio-gases. Sin embargo, son su potencial para mejorar los biocombustibles, junto con su densidad de energía, lo que ha incrementado su interés internacional.

Strevoz et al. (2006) aseguran que el creciente interés internacional en la conversión de biomasa es doble, por un lado la disminución de las reservas de combustibles fósiles y por otro la excesiva cantidad de emisiones de gases invernadero asociados al sector del transporte. Ellos conciben que la tecnología de conversión de biomasa puede coexistir con la existente tecnología de combustibles fósiles para generar energía sin necesitar modificaciones técnicas.

Los biocombustibles pueden ser clasificados en dos tipos: primario y secundario.

**Biocombustibles primarios:** son los diferentes tipos de biomasa usados sin procesar, como astillas o pellets de madera o leña. A menudo son usados para calefacción, cocinar o producción de energía.

**Biocombustibles secundarios:** pueden ser a su vez clasificados como de primera, segunda o tercera generación como se muestra en la tabla 2.1. Esta clasificación más detallada depende de la tecnología empleada para su producción y de la materia prima usada en su obtención:

- *Biocombustibles de primera generación:* son aquellos que en la actualidad ya han alcanzado una etapa de producción comercial. En general, proceden de cosechas cultivadas con técnicas similares a las cosechas agrícolas alimenticias
- *Biocombustibles de segunda generación:* no compiten por la utilización de suelos agrícolas, sino que son producidos a partir de biomasa lignocelulósica como la contenida en paja, hierba, tallos, cañas, raíces, madera, cáscaras, etc.
- *Biocombustibles de tercera generación:* son, principalmente, los aceites procedentes de algas y el hidrógeno procedente de biomasa.

Biocombustibles			
Primarios	Secundarios		
Astillas de madera	Primera generación	Segunda generación	Tercera generación
Pellets de madera	Semillas, granos o azúcar.	Biomasa lignocelulósica	Algas
Residuos animales	Bioetanol o butano por fermentación de almidón o azúcar.	Bioetanol o butanol por hidrólisis enzimática	Biodiesel a partir de algas
Residuos forestales o de cultivos		Metanol gasolina y diesel, alcohol mixto, dimetil éter y ecodiesel por procesos termoquímicos	Bioetanol a partir de algas
Gases de vertedero		Biometano por digestión anaeróbica.	Hidrógeno de algas verdes y microbios

**Tabla 2.1: Clasificación de biocombustibles. (Nigam y Singh).**

Hay muchas ventajas asociadas a la producción de biocombustibles de segunda generación. Nigam y Singh (2011) resaltan que la principal ventaja es que la biomasa agrícola es no comestible o bien residuos no comestibles de la producción de cultivos para alimentación o plantas no comestibles. Sus hallazgos van encaminados a eliminar la discusión entre suministrar combustible o suministrar alimentos asociada al biocombustible de primera generación. Nigam y Singh (2011) también destacan que los biocombustibles de segunda generación incrementarán la eficiencia de la tierra usada comparada con los biocombustibles de primera generación, la materia prima usada para el proceso puede crecer específicamente para este propósito. Siendo el resultado mayores niveles de producción por área de tierra.

Hay también algunas desventajas en la producción de biocombustibles de segunda generación:

- Los métodos de producción necesitan un equipamiento más sofisticado que la producción de combustibles fósiles y la producción de otros combustibles secundarios. Consecuentemente, se necesita un incremento en la cantidad de inversión por unidad de producción.
- El gasto en instalaciones a pequeña escala es otro aspecto negativo. Para que la producción sea económicamente viable se necesitan instalaciones mayores.

Las desventajas asociadas con biocombustibles de segunda generación no dificultarán el desarrollo de estas tecnologías; simplemente conducirá a la necesidad de más investigación y desarrollo para la producción de materias primas y tecnología de conversión.

La tabla 2.2 muestra los potenciales beneficios y desafíos de la producción y el uso de ambos tipos de biocombustibles primarios y secundarios.

<b>Beneficios</b>	<b>Desafíos</b>
<b><i>Seguridad energética</i></b>	<b><i>Materia prima</i></b>
Fuente de energía nacional	Red de colectores
Distribuida localmente	Facilidad de almacenamiento
Buena comunicación oferta-demanda	Competencia entre combustible y alimentación
Alta rentabilidad	
	<b><i>Tecnología</i></b>
<b><i>Estabilidad económica</i></b>	Pretratamiento
Estabilidad de precio	Producción enzimática
generación de empleo	Coste de la tecnología
Desarrollo rural	Producción de coproductos con valor añadido
Reduce la competencia entre combustibles	
Reduce la diferencia entre la oferta y la demanda	<b><i>Legislación</i></b>
Abre nuevas expectativas industriales	Cambio de uso del terreno
Controla el monopolio de los de los países ricos en combustibles fósiles	Ayudas para investigación y desarrollo
	Demostración a escala de planta piloto
<b><i>Mejoras medioambientales</i></b>	Despliegue a escala comercial
Mejor utilización de los residuos	Legislación para biocombustibles
Reduce la contaminación ambiental	Ayudas para la producción de biocombustibles
Reduce las emisiones de gases invernadero asociada al consumo de energía	Beneficios fiscales para la producción y utilización de biocombustibles
Reducción de vertederos	

**Tabla 2.2 Beneficios y desafíos del uso de biocombustibles primarios y secundarios.**

## 2.1. Tecnología actual para el procesamiento de biomasa

En la actualidad se están investigando y usando varios procesos para la obtención de biomasa. Hay principalmente tres tipos de procesos: procesos térmicos, procesos bioquímicos y procesos físicos. En la tabla 2.3 podemos observar los distintos procesos, la tecnología usada y los productos obtenidos en cada uno de ellos.

Tipo de Proceso	Tecnología	Productos
Procesos térmicos	Combustión	Calor
		Vapor
		Electricidad
	Gasificación	Vapor
		Calor
		Electricidad
		Metano
		Hidrogeno
		Carbón
	Pirolisis	Biogas
		Biooil
		Biocombustibles
Procesos bioquímicos	Digestión anaerobia	Biogas
		Compostaje
		Etanol
Procesos físicos	Esterificación	Biocombustibles

**Tabla 2.3 Procesos para el tratamiento de biomasa.**

En la tabla podemos observar que los biooil los obtenemos a partir de un proceso térmico: **la pirolisis**.

### 2.1.1 Pirolisis

La pirolisis es uno de los procesos más antiguos para procesar la biomasa (Budarin et al. 2009). En el proceso de pirolisis la biomasa es tratada térmicamente en un rango de temperaturas entre los 200°C y los 600°C. Los productos obtenidos a partir de este procedimiento son bio-gas, biooil y char. El tratamiento térmico lidera tanto la licuefacción como la gasificación de la biomasa desprendiendo compuestos volátiles y semivolátiles. Las condiciones del proceso pueden cambiar para maximizar el rendimiento de cada uno de los productos. Una pirolisis rápida, que requiere unas cantidades altas de calor y tiene lugar a temperaturas intermedias, favorece la obtención de mayores cantidades de biooils. (Meier and Faix, 1999).

Como la pirolisis consiste en una serie de reacciones endotérmicas, el proceso requiere un continuo aporte de calor. Calentamiento externo por convección, conducción y radiación son los métodos típicos empleados en hornos eléctricos o de gas. Desafortunadamente estos métodos no favorecen la conversión a biooil y tienen desventajas. El proceso experimenta poca transferencia de calor y gran pérdida de calor al exterior. Un calentamiento eléctrico y continuo puede causar daños a las paredes del reactor y hace necesarios unos tiempos de residencia altos. Esto sumado a las altas temperaturas necesarias para la pirolisis causa una serie de reacciones secundarias indeseables. Un craqueo más profundo del bioaceite produce gases no condensables y dan un producto de baja calidad.

Como alternativa a la pirolisis convencional, existen una creciente cantidad de investigaciones que conducen a la descomposición de biomasa asistida por microondas. Tiene muchas ventajas que se enumeran a continuación.

## **2.2. Descomposición de la biomasa asistida con microondas**

Clark et al. (2000) destacan que los métodos de calentamiento convencionales pueden ser mejorados por el uso de tecnologías de calentamiento con microondas. Son muchas las ventajas asociadas al uso de la tecnología de microondas para la descomposición de biomasa sobre los métodos tradicionales:

- Mejora la eficiencia energética
- Balance favorable de energía
- Requerimientos de temperatura más bajos
- Alta capacidad de pirolisis
- Calentamiento rápido
- Mejor control
- Producto consistente en mezclas químicas más simples
- Producto más cercano a los requerimientos para el transporte de combustibles
- Bajo contenido en azufre, ácidos y metales alcalinos.

Salema y Ani (2011) investigaron el uso de microondas para la pirolisis del aceite de palma.



Establecieron que el uso de microondas para el calentamiento de la biomasa era efectivo e hicieron posible el procesamiento de partículas más grandes. También determinaron que la presencia de un absorbedor de microondas tiene un efecto positivo en el rendimiento de la producción de biooil.

Wan et al. Han intentado mejorar la selectividad del producto en el proceso de catálisis.

Los análisis demostraron que el número de compuestos que componen los biooils se reducen notablemente con la presencia de un catalizador. La investigación propone que el catalizador tiene un efecto sobre el porcentaje de rendimiento de biooil, gas y char. Sin embargo, no ofrece una explicación de cómo el catalizador influye en los porcentajes de rendimiento, puede ocurrir de la siguiente forma, el catalizador puede funcionar como absorbedor de microondas, como en la investigación presentada por Salema y Ani (2011).

Budarin et al (2009) realizaron el proceso mediante una continua separación de productos a baja temperatura. Esto dio lugar a compuestos que estaban más acordes con la especificación requerida para las aplicaciones del combustible cuando las comparamos con las producidas a altas temperaturas.

Robinson et al. (2010) identificaron que aunque estudios previos demostraron los beneficios de usar tecnología de microondas, ningún estudio explicaba el mecanismo del proceso que conducía a mayores ventajas. Las principales diferencias entre el calentamiento con microondas y el calentamiento convencional son:

- Moléculas individuales pueden ser calentadas de forma directa e instantánea.
- Las diferentes sustancias pueden ser selectivamente calentadas en distintos grados.

Muchos de los estudios que han tenido lugar usando procesos discontinuos con microondas requieren tiempos de residencia entre 15 y 25 minutos, dependiendo del tamaño de las partículas. Este proyecto va encaminado a realizar la descomposición de la biomasa sólida de forma continua.

### **2.3. Flujo continuo de sólidos en un reactor tubular**

Para permitir un buen control del proceso en continuo se necesita una alimentación regular, uniforme y continua. Cummer and Brown (2002) revisaron el equipamiento secundario para la gasificación de la biomasa. Esto determinó que el transporte de biomasa se producía de forma adecuada mediante transporte neumático, mediante un tornillo sin fin o mediante una cinta. Sin embargo, hay pocas evidencias de que estos métodos sean eficaces para mover biomasa hacia el reactor.

### 2.3.1 Transporte neumático

El transporte neumático es el método más común para el flujo continuo de sólidos. En este tipo de movimiento los sólidos están suspendidos o son forzados por una corriente de gas que los transporta a través de una tubería, horizontal o vertical y puede ser usado para transportar una amplio rango de partículas, desde pellets hasta polvo fino (Chemical Engineers' Resource Page, 2006).

Para el transporte continuo de sólidos hay dos métodos reconocidos:

- *Transporte en fase diluida*: cuando el sólido es transportado como suspensión en una corriente gaseosa, normalmente aire, a través de una tubería.
- *Transporte en fase densa*: el material es transportado a baja velocidad y no está suspendido en una corriente gaseosa. (Mills et al 2004).

La fase gas puede ser suministrada por un compresor o una bomba de vacío. Para esta aplicación la fase diluida es más apropiada.

El transporte neumático está bien establecido como método de transporte de partículas sólidas de biomasa en aire desde el depósito de almacenaje hasta el reactor. Cui y Grace (2006) elaboraron un estudio sobre el transporte neumático de diferentes tipos de biomasa transportados al reactor. Establecieron la mayoría de las investigaciones en este área haciendo uso de tuberías verticales y horizontales para el transporte de grano en la agricultura. No hay apenas investigaciones sobre superficies inclinadas, esto podría ser debido a los fenómenos de segregación asociados. La bibliografía es también escasa en investigaciones sobre el uso de transporte neumático para facilitar el paso de biomasa hacia el reactor.

### 2.3.2 Alimentación con tornillo sin fin

Un sistema alimentado con tornillo sin fin trabaja por descarga constante de material. La biomasa es almacenada en la tolva de alimentación y el flujo es controlado por el tornillo sin fin, siendo el proceso alimentado de manera constante, la velocidad de alimentación se determina con la velocidad del tornillo.

Un tornillo sin fin es un dispositivo de transporte volumétrico, que transporta una cierta cantidad de volumen en una revolución del tornillo.

La velocidad con la que el volumen es alimentado depende de 3 factores:

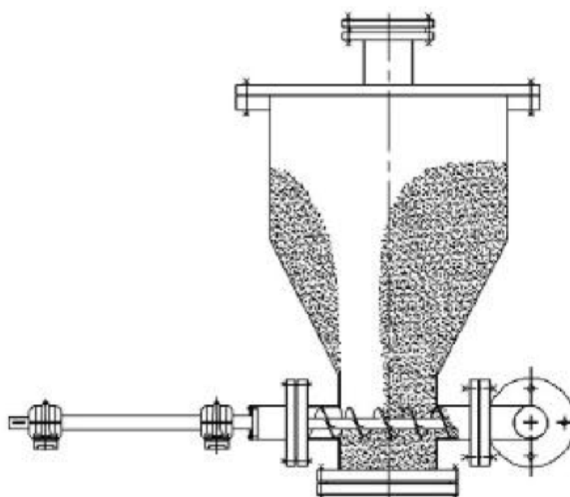
- Diámetro interior y exterior del tornillo.
- Distancia entre hilos.
- El grado en el que el alimentador este lleno.

Dai y Grace (2011) realizaron una investigación sobre los sistemas de alimentación de biomasa granulada. Determinaron que hay muchos factores que afectan a la eficacia del sistema de alimentación con tornillo sin fin y a la continuidad de la alimentación. Usando partículas con las siguientes características es posible que se produzcan bloqueos en la alimentación:

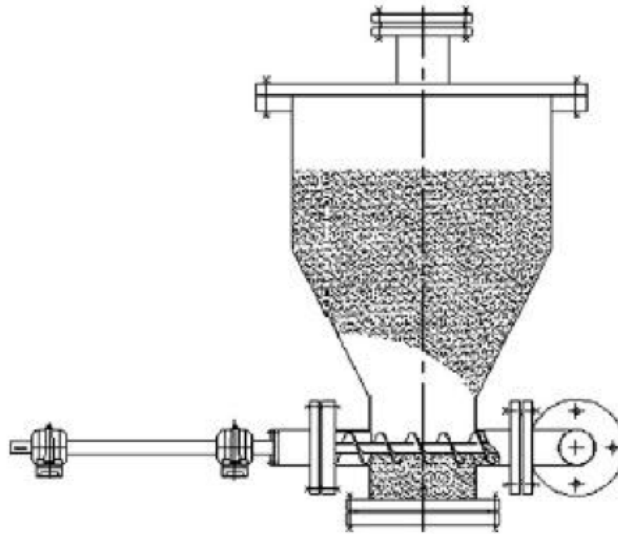
- Gran tamaño.
- Formas irregulares
- Gran densidad
- Superficie rugosa
- Poca movilidad

Un exceso en la cantidad de biomasa en la tolva de alimentación también puede incrementar la probabilidad de bloqueo. Ya comentamos que la velocidad y el tamaño del tornillo determinaban la velocidad de alimentación de biomasa, sin embargo la compresibilidad de la biomasa también puede afectar al flujo.

Es importante entonces, en el diseño del tornillo sin fin así como en el diseño del sistema de transporte neumático, considerar el diseño de la tolva de alimentación para evitar adherencias de biomasa a las paredes de la tolva como podemos ver en la imagen 2.1, o la formación de un puente como muestra la imagen 2.2. Ya que pueden dar lugar a una interrupción en la alimentación, y una alimentación estable es esencial en el proceso de pirolisis de biomasa.



**Imagen 2.1 Biomasa adherida a la tolva de alimentación.**

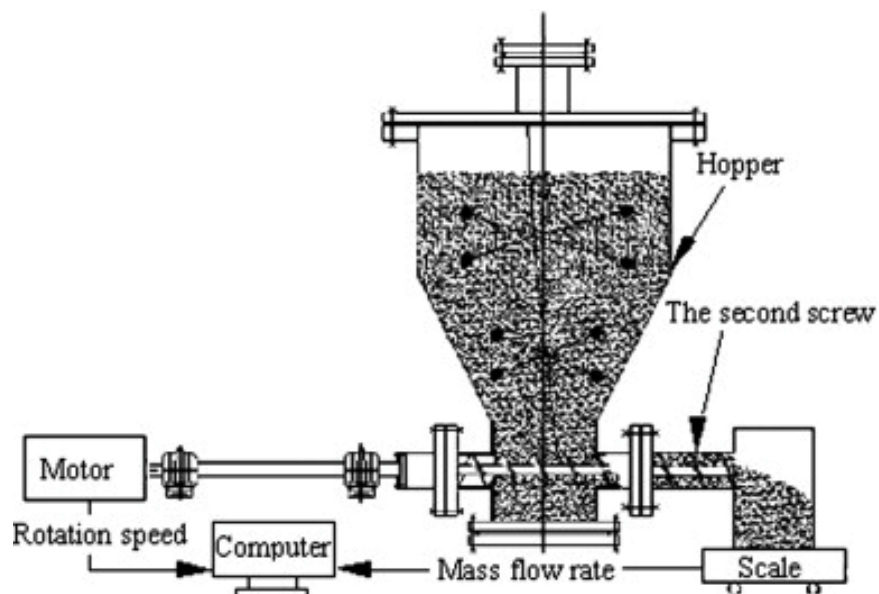


**Imagen 2.2 Puente formado por la biomasa en la tolva de alimentación.**

Zhang et al (2011) desarrollaron un sistema automático de agitación para evitar la inestabilidad en la alimentación y facilitar una alimentación continua.

### **2.3.3 Mecanismo de agitación**

El mecanismo de agitación automático fue ideado para ser compatible con un sistema de alimentación por doble tornillo sin fin.



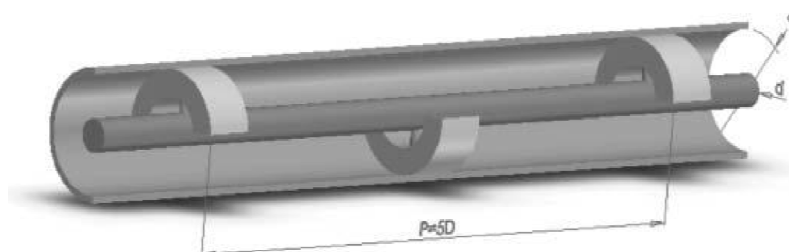
**Imagen 2.3 Mecanismo de agitación asociado a un tornillo sin fin.**

El mecanismo mostrado en la imagen 2.3 está formado por un resorte y dos dispositivos consistentes en dos aspas con un diámetro adaptado a las dimensiones de la tolva, tienen seis brazos cada una con bolas de aluminio en la punta y están dispuestas a intervalos a lo largo del resorte, este está fijado a la tapa del depósito de alimentación y descansa en los hilos del tornillo sin fin, cuando el tornillo se mueve el muelle con él y entonces rebota volviendo a su posición inicial produciendo una vibración a lo largo del resorte que hace vibrar las aspas, este movimiento del resorte y de las aspas previenen de la formación de puentes en la tolva de alimentación de biomasa. Las bolas de aluminio están en contacto con las paredes de la tolva y evitan la formación de adherencias. El mecanismo está especializado para sistemas que emplean un doble tornillo sin fin para alimentación.

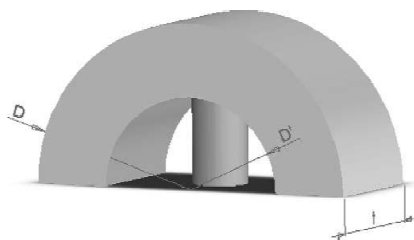
#### 2.4. Rascador con movimiento alternativo

El rascador con movimiento alternativo es usualmente aplicado en intercambiadores de calor para líquidos viscosos. De Goede y D Jones (1993) investigaron las propiedades de transferencia de calor de un intercambiador de calor de superficie raspada en régimen turbulento. El rascador con rotación se emplea en el interior de intercambiadores de calor y la adición de la rotación mejora la transferencia de calor del sistema y limpia la superficie interior del tubo, removiendo cualquier resistencia adicional en las paredes del intercambiador de calor causadas por incrustaciones. Martínez et. al. (2010), Solano et al (2010) y Solano et. al. (2011), han estado investigando un intercambiador de calor de superficie raspada que utiliza movimiento alternativo sin rotación. Además de mejorar la transferencia de calor en las paredes del intercambiador se observó que el movimiento alternativo genera desplazamientos microscópicos del flujo, incrementando el mezclado en el interior del intercambiador Solano et. al. (2010) investigaron los patrones de flujo mostrados por líquidos de viscosidad variable. El patrón de flujo y mezclado es distinto para los movimientos a favor de corriente y contra corriente.

El rascador usado por Martínez et. al. (2010), Solano et. al. (2010) y Solano et. al. (2011) se muestra en la imagen 2.4. Una colección de elementos semicirculares montados sobre una varilla con una distancia entre ellos de  $5D$ . Los elementos semicirculares mostrados en la imagen 2.5. están encajados dentro del tubo de tal manera que con el movimiento alternativo eliminan las incrustaciones.



**Imagen 2.4 Rascador alternativo (Solano et al, 2011).**



**Imagen 2.5 Dimensiones de las palas del rascador. (Solano et. al.)**

Este área de investigación es muy relevante para nuestro ensayo, sin embargo hasta ahora se ha limitado a observar el flujo de líquidos en la región laminar. En este proyecto se empleará el movimiento alternativo para investigar el flujo multifase sólido – gas en régimen turbulento.

## **2.5. Modelado de flujo de biomasa sólida con reactores tubulares**

De acuerdo con Cui y Grace (2006) se han realizado pocos trabajos relacionados con el transporte neumático de biomasa y muchos de ellos solo experimentales. Esto es debido a que el software de modelado de flujo como “Computational Fluid Dynamics” no tienen la capacidad de proporcionar buenas simulaciones para esta aplicación.

Singh y Lo (2009) modelaron el transporte neumático de partículas sólidas con el fin de predecir la caída de presión. Usaremos el modelado de elementos finitos, en CFO para modelar el flujo del fluido, también emplearemos las ecuaciones de Navier-Stokes y el modelado de k-Epsilon para flujo turbulento. Las partículas no esféricas se modelaron por combinación de muchas esferas individuales, se asumió que las partículas se introducen a la geometría a través de una distribución uniforme. Las partículas viajan en el fluido bajo al influencia del arrastre del fluido y su propio peso. La dirección que siguen las partículas depende de las colisiones que se pueden producir entre partículas y las colisiones que se producen con obstáculos. El arrastre experimentado por las partículas depende de la forma de la partícula.

Frankel (2011) modeló el flujo de pellets de polímetro en un codo. Para describir el flujo de partícula se usó el modelado de fase discreta y para describir el flujo turbulento se usó el modelo K-Epsilon. Las partículas se inyectaron usando una superficie de inyección en la entrada y fueron modelados como partículas esféricas. Lo cual significa que ambas fases, continua y discreta se ven afectadas la una por la otra. Los resultados no han sido contrastados con datos experimentales por lo que no se puede determinar si el modelo se adapta a la realidad.

### **3. Trabajo experimental**

En el trabajo experimental vamos a considerar las siguientes variables:

#### **3.1. Variables experimentales**

##### **3.1.1 Caudal de aire**

El caudal de aire requerido para el transporte neumático de biomasa se ha identificado como una variable significativa en los ensayos experimentales. Proporciona el movimiento de la biomasa y también determina el tiempo de residencia en el reactor.

##### **3.1.2 Concentración de biomasa**

Variable importante para la investigación, será usada para conseguir datos sobre el rango de concentraciones cuando usamos transporte neumático para el transporte de biomasa. Por medio de una válvula que operaremos de forma manual podemos variar la cantidad de biomasa suministrada desde la tolva de alimentación.

##### **3.1.3 Velocidad del rascador**

Intentaremos determinar los efectos que producen la variación de la velocidad del rascador tanto en el transporte neumático de biomasa como en el mezclado

##### **3.1.4 Tipo de biomasa**

Los ensayos experimentales se realizaron con dos tipos de biomasa. Los patrones de flujo producidos por los dos tipos son comparables.

###### **3.1.4.1 Biomasa en forma de pellets de madera**

Los pellets de madera tienen una densidad de 1.1 g/cm<sup>3</sup>, forma cilíndrica de 5mm de diámetro y una longitud entre 10 20 mm.



**Imagen 3.1. Biomasa en forma de pellets de madera**



#### **3.1.4.2 Biomasa en forma de paja molida**

La paja molida tiene una densidad de 0,117 g/cm<sup>3</sup> y dimensiones aproximadas 1mm de diámetro y una longitud de 1 – 5 mm.



**Imagen 3.2 Biomasa en forma de paja molida**

#### **3.1.5 Tamaño del reactor**

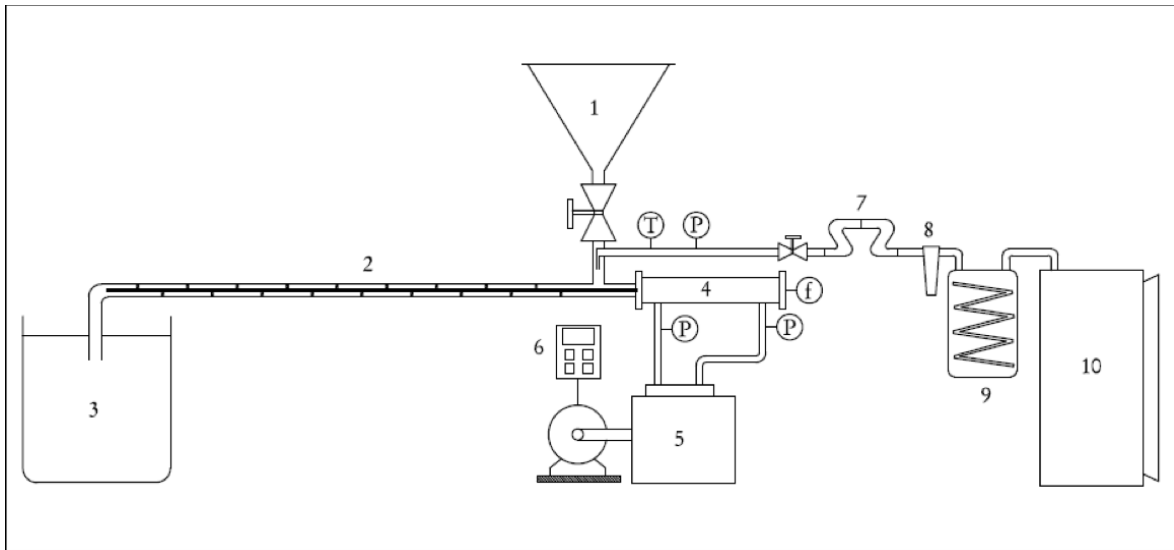
En los ensayos experimentales se han usado tuberías de 2 diámetros distintos: 74mm y 37 mm.

Los primeros ensayos se realizarán con el tubo de mayor diámetro probando los dos tipos de biomasa y posteriormente se probará la paja molida en el de menor diámetro (37 mm).

### **3.2. Equipo experimental**

En la imagen 3.3 podemos observar un diagrama de la instalación usada en los ensayos. El rascador está en el interior del reactor tubular, el pistón hidráulico nos proporciona el movimiento alternativo del rascador. La unidad hidráulica consta de un tanque de aceite, una bomba y una válvula de 4 Vías. Se usa un convertidor de frecuencia para regular la velocidad de la bomba. La biomasa se almacena en la tolva de alimentación situada a la entrada y alimenta al reactor por gravedad. La biomasa es neumáticamente transportada a lo largo del reactor suspendida en la corriente de aire suministrado por el compresor. En los ensayos experimentales se usa aire para el transporte neumático de biomasa sin embargo deberíamos usar un gas inerte como el nitrógeno debido a que la reacción requiere condiciones inertes. El aire pasa a través de un deshumidificador y un filtro antes de llegar al medidor de caudal. La biomasa que atraviesa el reactor se recoge en el depósito situado al final del reactor.





**Imagen 3.3 Representación esquemática de la instalación.**

### 3.2.1 Tolva de alimentación

En la fotografía 3.5 podemos ver la tolva (con un volumen aproximado de 30l). Usamos una tapa para aliviar la caída de presión en la tolva de alimentación, hay una delgada capa de teflón entre la tolva y está sujeta por abrazaderas metálicas para asegurar que no existen fugas de aire.



**Imagen 3.5. Tolva de alimentación.**

### 3.2.2 Válvula de alimentación de biomasa

El flujo de biomasa es controlado por una válvula de bola de acción manual como podemos ver en la imagen. No es la mejor válvula para el control del caudal pero debidos a problemas de disponibilidad era la única que teníamos con el diámetro necesario.



Imagen 3.6 Válvula de alimentación de biomasa.

### 3.2.3 Pistón hidráulico



Imagen 3.7. Pistón hidráulico

El pistón hidráulico, mostrado en la figura 3.7 proporciona el movimiento alternativo al rascador. La longitud del movimiento alternativo, conocido como carrera, está determinada por la distancia entre los interruptores conocidos como final de carrera, como podemos ver en la imagen 3.8.



**Imagen 3.8. Pistón hidráulico usado en los ensayos.**

La imagen 3.7 pertenece al pistón que se usará en los ensayos con periodos cortos del rascador 2,5 s y 1 s. En la tabla 3.1 podemos ver las dimensiones de los dos pistones usados en los ensayos experimentales.

	Pistón 1	Pistón 2
Periodo del rascador	Inmóvil, 10s, 5s.	2.5s, 1s.
Diámetro de la cámara, $D_c$	50mm	24.9mm
Diámetro del pistón, $D_p$	20mm	18mm
Carrera	180mm	175mm

**Tabla 3.1 Dimensiones de los pistones hidráulicos usados en los ensayos.**

### 3.2.4 Reactor tubular

El reactor tubular tiene un diámetro de 74 mm y una longitud aproximada de 1,8 m. El tubo está construido en plástico transparente para permitir la observación del patrón de flujo de biomasa en el interior del reactor.

#### 3.2.4.1 Conexión de la tubería de alimentación de biomasa y el pistón



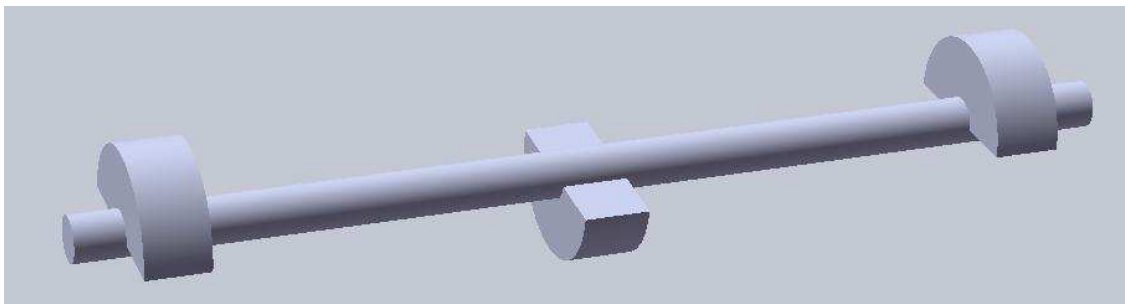
**Imagen 3.9. Conexión entre reactor tubular y pistón hidráulico.**

El reactor tubular y el tubo de alimentación de biomasa están conectados mediante una unión en T. La varilla del rascador está conectada a la varilla del pistón de ahí el uso de la unión en T.

#### 3.2.4.2 Conexión del depósito

Existe un depósito al final del reactor para recoger la biomasa. El depósito está situado bajo el reactor. Cuando la biomasa atraviesa el reactor se produce mucho polvo al chocar la biomasa con las palas del rascador, debido a esto la entrada del depósito está tapada con un material poroso que evita la salida del polvo pero permite el paso de aire.

#### 3.2.5 Rascador con movimiento alternativo



**Imagen 3.10 Rascador con movimiento alternativo**

La imagen 3.10. muestra un diagrama de la geometría del rascador usado en los ensayos experimentales. Las palas del rascador difieren de las usadas por Solano et. al. como podemos ver en la imagen 3.11., donde el rascador usado en nuestro ensayo es el de la izquierda y el de la derecha el usado por Solano.

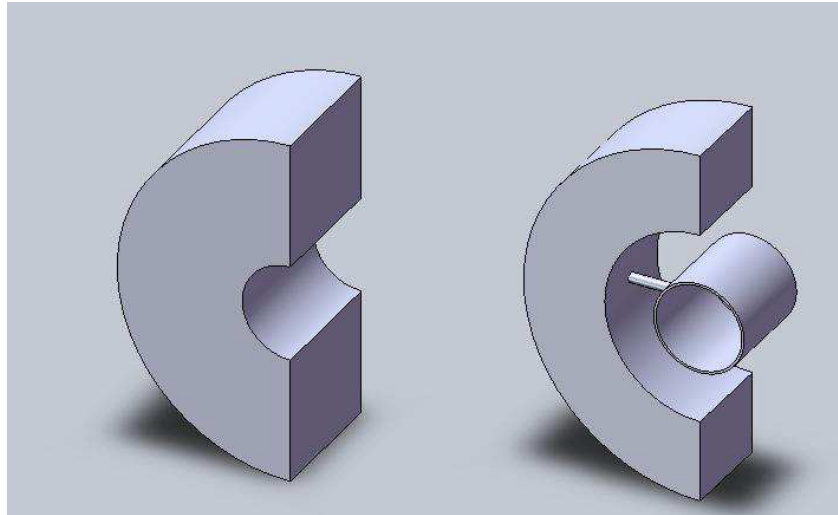


Imagen 3.11 Palas del rascador

### 3.2.6 Compresor de aire



Imagen 3.12 Compresor de aire.

Usamos el compresor de aire que podemos ver en la imagen 3.12 para proporcionar el caudal necesario de aire para el transporte neumático de biomasa. El compresor aumenta, la presión de aire a 8 bares en un tanque de retención. El aire atraviesa un deshumidificador y un filtro como podemos ver en la imagen 3.13 para eliminar humedades e impurezas antes de entrar en contacto con la biomasa.





**Imagen 3.13 Deshumidificador y filtro.**

### 3.2.7 Medidor de caudal



**Imagen 3.14 Coriolis.**

El caudalímetro tipo Coriolis mostrado en la imagen 3.14 está situado en la tubería de entrada de aire para medir el caudal de aire usado para mover la biomasa. El caudalímetro empleado es un “model micromotion flow meter” con un rango de 0 – 500 kg/h y una salida de 4 a 20 mA.

### 3.2.8 Válvula de flujo de aire



**Imagen 3.15. Válvula de flujo de aire.**

En la fotografía podemos observar una válvula de bola de acción manual situada en la tubería de aire cerca del tubo de alimentación de biomasa para controlar el caudal de aire que entra al reactor.

### 3.2.9 Cámara de alta velocidad



**Imagen 3.16 Cámara de alta velocidad.**

La cámara de alta velocidad está montada en el techo (sobre la instalación) para poder grabar videos del flujo de biomasa en el interior del reactor. En la imagen 3.17 podemos ver la posición de la cámara con respecto a la instalación. La cámara de alta velocidad está situada encima de la instalación y la cámara digital instalada frente a la instalación para grabar videos.



**Imagen 3.17** Posición de la cámara de alta velocidad sobre la instalación.

Debajo del reactor hemos colocado una hoja tamaño A3 blanca para proporcionar un fondo neutro para las grabaciones, tal y como podemos ver en la imagen 3.18.



**Imagen 3.18.** Reactor tubular.



### 3.2.10 Instrumentación

#### 3.2.10.1 Termopares

Medimos la temperatura usando un termopar tipo T, que tiene un rango de medición de 50 a 400 °C. Los datos medidos los usaremos para calcular valores precisos de densidad y la viscosidad cinemática del aire usado en las curvas de correlación, que podemos ver en los apéndices II y III. Los valores de densidad y viscosidad cinemática que hemos calculado los usaremos posteriormente para calcular el número de Reynolds usado para determinar el régimen de flujo del fluido.

#### 3.2.10.2 Sensor de presión en la entrada de aire



**Imagen 3.19. Sensor de presión de aire.**

La presión a la entrada se mide usando un sensor piezoresistivo con un rango de medida de 0 – 5 bares (presión relativa) y una salida 0 – 10 v

#### 3.2.10.3 Sensor de presión en el pistón

Mediremos también la presión en ambas cámaras del pistón hidráulico para poder calcular el consumo energético. Usaremos un sensor piezoresistivo similar al anterior, con un rango de medida mayor de 0 – 20 bares (presión relativa) y con una salida de 0 - 10 v.



Imagen 3.20 Sensor de presión en el pistón.

### 3.3. Medidas experimentales

#### 3.3.1 Número de Reynolds

El número de Reynolds es un número adimensional que describe la relación entre fuerzas inerciales y fuerzas viscosas. Describimos el número de Reynolds con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}; \quad 3.1$$

Para nuestros ensayos deberíamos usar el diámetro hidráulico, ya que la geometría del reactor es la de un canal no circular ya que es un tubo con una varilla en el centro. El diámetro hidráulico se determina por el área de sección transversal dividido por el perímetro mojado.

$$D_H = \frac{4A}{P_m}; \quad 3.2$$

El área de la sección del tubo viene dada por la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4}; \quad 3.3$$

Y el perímetro mojado:

$$P_m = (\pi D_o + \pi D_i); \quad 3.4$$

Con estas ecuaciones el diámetro hidráulico nos queda:

$$\begin{aligned}
 D_H &= \frac{4\pi(D_1^2 \cdots D_n^2)}{4\pi(D_1 + D_n)} \\
 D_H &= \frac{(D_1^2 \cdots D_n^2)}{(D_1 + D_n)} \\
 D_H &= \frac{(D_1 + D_n)(D_1 \cdots D_n)}{(D_1 + D_n)} \\
 D_H &= (D_1 \cdots D_n)
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Para obtener el número de Reynolds en términos de caudal másico, determinamos la velocidad con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{Q}{A} \\
 Q &= \frac{\dot{m}}{\rho} \\
 V &= \frac{4\dot{m}}{\rho\pi(D_1^2 \cdots D_n^2)}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Tomando la temperatura del aire podemos calcular valores exactos de la viscosidad cinemática y la densidad del aire. La viscosidad dinámica puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$\mu = \rho\nu \tag{3.7}$$

Por lo tanto el número de Reynolds nos queda:

$$\begin{aligned}
 Re &= \frac{\rho 4\dot{m}(D_1 \cdots D_n)}{\mu \pi (D_1^2 \cdots D_n^2)} \\
 Re &= \frac{4\dot{m}}{\pi \rho \nu (D_1 + D_n)}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

### 3.3.2 Número de Stokes

El número de Stokes es un parámetro adimensional que usamos para describir el patrón de flujo de una partícula en un determinado fluido.

$$St = \frac{\tau V}{D_p} \tag{3.9}$$

El tiempo de respuesta de la partícula es el tiempo que necesita la partícula para responder a un cambio en el flujo del fluido. Esto puede ser un cambio en la velocidad o en la dirección, puede ser provocado por un obstáculo en el camino del fluido. El tiempo de respuesta de la partícula se puede determinar cómo:

$$\tau = \frac{D_p^2 \rho_f}{18\mu} \quad 3.10$$

Combinando las ecuaciones 3.9 y 3.10 y la relación que une la viscosidad dinámica y viscosidad cinemática, ecuación 3.7, el número de Stoke nos queda

$$St = \frac{D_p^2 \rho_f V}{18 \mu_f v_s D_p} \quad 3.11$$

Para partículas con un número de Stokes mucho más grande que uno ( $St \gg 1$ ), esto supone que la partícula tenderá a no ser afectada por el cambio de flujo del fluido y continuará con la trayectoria original, impactando con el obstáculo, contrariamente una partícula con un número de Stokes mucho más bajo que uno, está muy influenciada por el flujo de fluido y seguirá el camino de fluido evitando la colisión con los obstáculos.

Generalmente partículas con alta densidad tienen un número de Stokes alto. En este caso sugiere que los pellets de madera tendrán alto número de Stokes en comparación con la paja molida. Por lo tanto esto implica que la paja molida debería seguir el patrón de flujo del aire en el reactor tubular y no debería chocar con las palas del rascador tanto como los pellets de madera.

Otros han usado el número de Froude para clasificar el flujo de biomasa en el transporte neumático. El número de Froude es un parámetro adimensional usado para indicar la influencia de la gravedad en el movimiento del fluido. A mayor número de Froude mayor resistencia. El número de Fraude generalmente se asocia a agua y no lo hemos considerado relevante para nuestros ensayos.

### 3.3.3 Consumo de energía

El consumo de energía del sistema se divide en dos partes: la energía requerida para el movimiento del pistón para mover el rascador y la energía consumida por la bomba de aire:

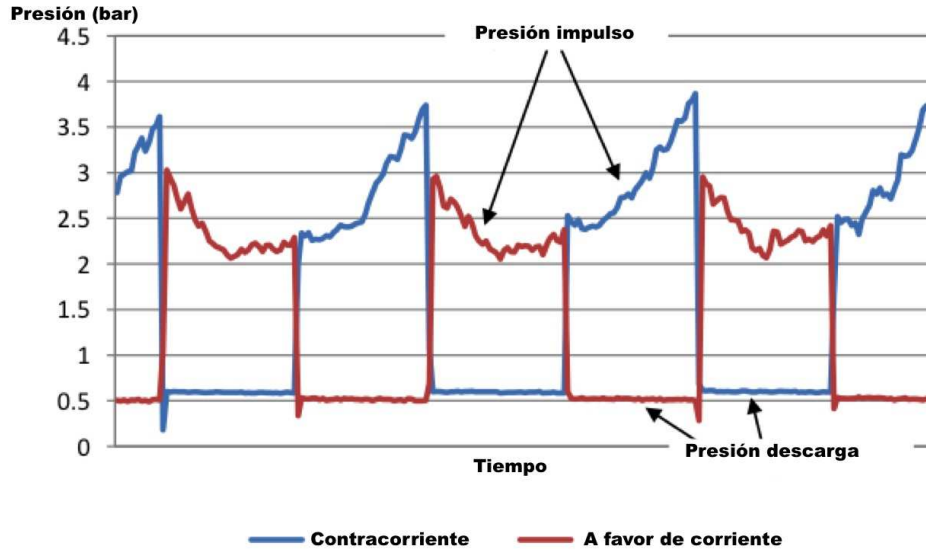
$$Energía = Energía_{rsc} + Energía_{b} \quad 3.12$$

Como describe Solano et al (2011) el consumo de energía del pistón se obtiene midiendo la presión de aceite, que depende del tiempo, en ambas cámaras del pistón hidráulico. Los explicamos en la siguiente ecuación:

$$Energía_{rsc} = \left( \frac{\pi(D_{c1}^2 - D_{c2}^2)}{4} \right) S \frac{\Delta P_{rsc}}{\Delta t_2} \quad 3.13$$

Donde  $\Delta t$ , periodo del rascador (s), es medido por un cronómetro conectado al final de carrera y S, carrera del pistón (m) es dos veces la distancia entre los interruptores de final de carrera.

La imagen 3.18 muestra la señal obtenida de los sensores de presión en el pistón hidráulico durante el ciclo del rascador:



3.18 Señal de presión durante un ciclo del rascador.

El rascador se mueve en la misma dirección que el flujo durante el movimiento a favor de corriente (medio ciclo), y por otro lado se mueve contracorriente en el otro medio ciclo.

La energía consumida para suministrar el aire a la instalación puede ser descrita por la siguiente ecuación:

$$Energía_{..} = Q \Delta P_{..}$$

Para el sistema usado, descrito en el apartado 3.2, el flujo másico es medido por el Coriolis. Por lo tanto, la energía necesaria para bombear el aire se calcula con la siguiente ecuación:

$$Energía_{..} = \frac{\dot{m} \Delta P_{..}}{\rho}$$

La ecuación para calcular la energía total consumida sería la siguiente:

$$Energía = \left( \frac{\pi (D_1^4 - D_2^4)}{4} \right) S \frac{\Delta P_{..}}{\Delta t_2} + \frac{\dot{m} \Delta P_{..}}{\rho}$$

### **3.3.4 Emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>**

La energía consumida en el funcionamiento de la instalación puede ser convertida a emisiones de CO<sub>2</sub>, que se miden en unidades de kilogramos de dióxido de carbono equivalente (kgCO<sub>2</sub>e). Para calcular la cantidad de emisiones de gases invernadero que se producen en el consumo energético podemos ver un factor de conversión para convertir la energía consumida a kWh a Kg de dióxido de carbono equivalente. Para convertir el consumo energético a kWh asumimos que la planta trabaja 8000 h/año, el factor de conversión a kg de dióxido de carbono es 0,54522 (IDAE 2011).

Para convertir el consumo energético a kWh y obtener los kilogramos de CO<sub>2</sub> usamos la siguiente ecuación.

$$\text{CO}_2 \text{ equivalente} = \text{energía (kW)} * 8000 \text{ h} * 0,54522$$

## **3.4. Condiciones experimentales**

### **3.4.1 Biomasa en forma de pellets de madera**

Inicialmente los ensayos experimentales se llevaron a cabo con pellets de madera para determinar el rango de caudales de aire para realizar el resto de ensayos. Los experimentos iniciales también permitieron conocer como varían el resto de parámetros, como la concentración de biomasa y el periodo del rascador

Estos ensayos también ayudaron a determinar el caudal de aire necesario para mover la biomasa. Se hizo evidente que el flujo de biomasa sería difícil de controlar ya que solo tendríamos un limitado rango de velocidades para el rascador.

Se proponen las siguientes variaciones para los parámetros experimentales en los ensayos con pellets de madera:

- variación de caudal de aire 110,135 y 160 kg/h
- variación de los periodos del rascador: 5s, 10s y rascador inmóvil.
- Variación de la apertura de la válvula de control: abierta al 50% y al 100%.

Observamos que el rango de caudales de aire elegido no era el adecuado para los ensayos así que lo ampliamos para ensayar con un caudal de 90 kg/h para todas las variaciones en el periodo del rascador y apertura de la válvula de alimentación de biomasa.

### **3.4.2 Biomasa en forma de paja molida**

Como en el apartado anterior los ensayos iniciales con paja molida ayudaron a determinar que el caudal de aire necesario para mover la biomasa en forma de paja molida era más pequeña que el caudal necesario para mover los pellets de madera. Como el pistón se mantiene constante y el rango de velocidades del rascador también es el mismo para los dos tipos de biomasa, se observó que el flujo de aire para mover la paja molida es más difícil de controlar y por lo tanto de variar, por lo que se decidió investigar solo una variación de flujo de biomasa

Por lo tanto llevamos a cabo las siguientes variaciones para los ensayos experimentales con paja molida:

- Variación de caudal de aire: 10,20 y 30 kg/h.
- Variación del periodo del rascador: 5s 10s y rascador inmóvil
- Válvula de control abierta a 100%
- Variación del reactor: diámetro 74 mm y 34mm

### **3.4.3 Cambios en el pistón**

Se usó un segundo pistón en los ensayos que nos permitió obtener velocidades más grandes en el rascador (periodos más cortos).

Los ensayos experimentales con un caudal de aire de 90kg/h se realizaron para incluir periodos del rascador de 2,5 s y de 1 s con la válvula de alimentación de biomasa totalmente abierta (100%). Estos ensayos experimentales añadidos también se aplicaron a un caudal de aire de 10 kg/h.

### **3.4.4 Rotación del rascador**

Las siguientes observaciones estudian el efecto que el movimiento alternativo del rascador tiene sobre el flujo de biomasa en el tubo y sugieren que la rotación de las palas del rascador podrían mejorar el mezclado y el movimiento neto de biomasa.

Por lo tanto, aumentamos los ensayos experimentales con un caudal de aire de 90 kg/h para los pellets de madera y 10 kg/h para la paja molida para investigar el efecto del rascador a altas velocidades.

#### **4. Resultados experimentales y comentarios**

##### **4.1. Número de Reynolds**

Los apéndices 4 y 5 muestran el número de Reynolds calculado para los caudales de aire ensayados con la biomasa como pellets de madera y biomasa como paja molida respectivamente. Las tablas muestran también las medidas de temperatura densidad y viscosidad cinemática para cada caudal de aire.

Podemos observar que todos los números de Reynolds calculados, para ambos tipos de biomasa, están en régimen turbulento. Los números de Reynolds obtenidos están en un rango de aproximadamente 39.000 a 98.000 para la paja molida y desde 308.000 a 559.000 para los pellets de madera.

##### **4.2. Características del flujo**

De los datos obtenidos en los ensayos experimentales se observa que ambos tipos de biomasa muestran patrones de flujo similares

###### **4.2.1 Biomasa como pellets de madera**

Las siguientes imágenes muestran el flujo de biomasa en forma de pellets de madera cuando en el reactor incrementamos el caudal de aire.



**Imagen 4.1. Pellets de madera, flujo de aire 10 kg/h.**



**Imagen 4.2. Pellets de madera, flujo de aire 30 kg/h.**





**Imagen 4.3. Pellets de madera, flujo de aire 90 kg/h.**



**Imagen 4.4. Pellets de madera, flujo de aire 110 kg/h.**

En todas las imágenes de los ensayos realizados el flujo va de derecha a izquierda.

En las imágenes podemos ver que hay dos patrones de flujo diferenciados en el flujo de la biomasa. Tenemos una fase rápida que está suspendida en el flujo de aire en la zona superior del reactor y una fase a granel más lenta en el fondo del tubo.

La fase a granel se ve afectada fuertemente por la gravedad y por la presencia de las palas del rascador. Cuando la biomasa entra en el reactor esta se asienta en el fondo. El volumen de biomasa rellena los huecos existentes entre las palas del rascador. Esto afecta a la fase a granel tanto que sin el movimiento alternativo no existiría movimiento de esta fase en el fondo del reactor.

Para determinar la extensión del efecto de las palas del rascador sobre el flujo de la fase a granel, habría sido interesante observar el flujo de biomasa a través de un tubo sin rascador. Aunque las palas del rascador proporcionan un obstáculo al flujo. Se pensó que incluso si el rascador fuera eliminado, la presencia de las dos fases no sería eliminada. Sin embargo, las fases no estarían tan diferenciadas y se observaría un perfil de velocidad más gradual a lo largo del plano vertical del reactor.

Un volumen de biomasa de la fase a granel se acumula delante y detrás de las palas del rascador. Esto es más evidente cuanto más alto es el caudal de aire donde una gran cantidad de biomasa está en la fase suspendida y deja libre un gran volumen del reactor como podemos observar en la imagen 4.4. Con un caudal bajo de aire la biomasa acumulada ocupa gran parte de la sección entre las palas del rascador y una cantidad pequeña de biomasa se encuentra en la fase suspendida como podemos observar en la imagen 4.1.

La fase suspendida consiste en una pequeña cantidad de biomasa que es arrastrada a lo largo de toda la longitud del reactor, suspendida en la corriente de aire. Como el grueso de la biomasa se asienta en el fondo del reactor la corriente de aire encontrará un camino más fácil para llegar al final del tubo, que está a presión atmosférica. Este camino lo encuentra en el hueco que deja la fase a granel en la zona superior del reactor. Dependiendo del caudal de aire variará la cantidad de biomasa arrastrada por la corriente de aire en la zona superior del reactor.

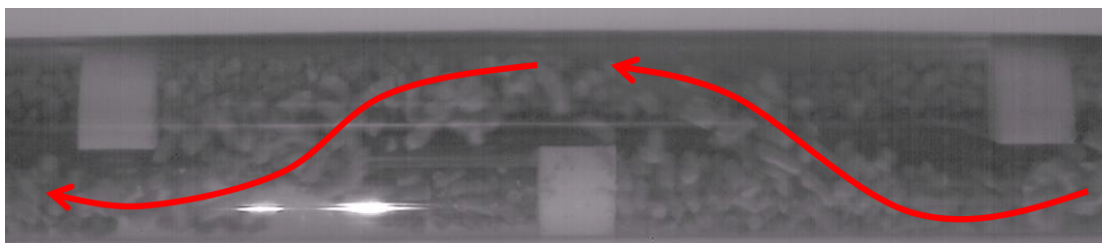


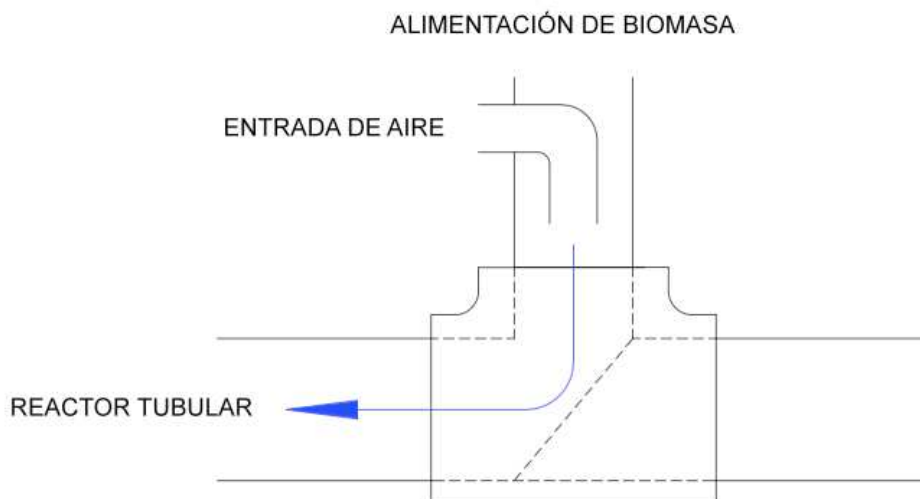
Imagen 4.5. Patrón de flujo de la fase suspendida.

En la imagen 4.5 podemos observar el patrón de flujo de la fase suspendida de biomasa. La fotografía está tomada desde la zona superior del reactor por lo tanto muestra el patrón de flujo en el plano horizontal. Las flechas rojas indican el camino seguido por la fase de biomasa suspendida a lo largo del reactor.

Podemos observar que la biomasa sigue un movimiento serpenteante entre las palas del rascador. Este patrón de flujo estará más marcado cuanto más bajo es el caudal de aire, se observa que al aumentar el caudal de aire la biomasa tiende a colisionar con las palas del rascador de manera más acusada. En la sección 3.3.2 se discute esta observación a través del número de Stokes.

La imagen describe con mayor precisión el patrón de flujo de la biomasa desde la entrada al reactor donde el patrón de flujo tuvo tiempo de evolucionar. Cuando la biomasa alcanza un estado cuasi-estacionario, los cambios en la dirección del flujo ocurren en su mayoría en el plano horizontal. Sin embargo, en la entrada del tubo se observó que la dirección del flujo también cambia en el plano vertical, siguiendo un camino helicoidal. Este patrón de flujo se puede deber al tipo y posicionamiento de la entrada de aire al reactor o debido al alto número de Reynolds asociado con el caudal de aire.

En la instalación, como podemos ver en la imagen 4.6, la entrada de aire esta situada de manera vertical al tubo de alimentación de biomasa. La tubería de entrada de aire tiene un codo a 90°. al entrar en el tubo de alimentación de biomasa. El aire deja la tubería de entrada y entra al tubo de alimentación hay entonces otro codo de 90 ° al tubo de reacción. El dispositivo a través del cual la varilla del rascador entra al reactor, tiene forma de cuña para evitar la acumulación de biomasa en el radio largo del codo.



**Imagen 4.6. Entrada de aire.**

Los cambios en la dirección del flujo de aire son debidos a las esquinas con las tuberías, los ángulos de la superficie, las inexactitudes en el ángulo de la tubería de entrada de aire, el tubo de alimentación de biomasa y el ángulo y rotación del accesorio de unión entre el pistón hidráulico y el rascador, todo afectará al caudal de aire y contribuirá al patrón de flujo observado. Esto podría explicar el patrón de flujo helicoidal observado en los ensayos.

La aplicación propuesta requiere una alimentación uniforme de biomasa para que la reacción tenga lugar de manera continua. Los patrones de flujo observados en los ensayos experimentales indican que la alimentación no se llevará a cabo de manera continua. El tiempo de residencia de la pequeña cantidad de biomasa será corto lo que indica que la longitud del reactor requerida será grande para poder completar la reacción. Por otro lado, el tiempo de residencia de la fase a granel será grande indicando que necesitaría un reactor de longitud corta. Sin embargo, si la longitud del reactor es demasiado corta no se conseguirá la conversión total de biomasa, por otro lado, si la longitud del reactor es demasiado larga, la biomasa reaccionará completamente y continuará su camino en el interior del reactor haciendo el sistema muy ineficiente. Para evitar esta situación es preferible que el flujo de biomasa sea uniforme a través de toda la sección del reactor.

Como el caudal de aire incrementa la cantidad de biomasa en fase suspendida la biomasa acumulada en el fondo del reactor disminuye, esto lo podemos comprobar en las imágenes de la 4.1 a la 4.4.

A cierto caudal de aire la fase a granel desaparece y la totalidad del flujo de biomasa está en suspensión. Para la biomasa en forma de pellets de madera esto ocurre con un caudal de 160 kg/h.

Como ya comentamos anteriormente el tiempo de residencia requerido para el proceso en discontinuo de descomposición de biomasa asistida por microondas es de entre 15 a 25 minutos, según la bibliografía. Si el caudal de aire necesario para el flujo de una sola fase de pellets de madera (160 kg/h) se toma en consideración esto significa que se requiere un reactor tubular demasiado largo. Lo cual no es viable. Para reducir la longitud del reactor, el caudal de biomasa y aire mezclado debería ser más uniforme.

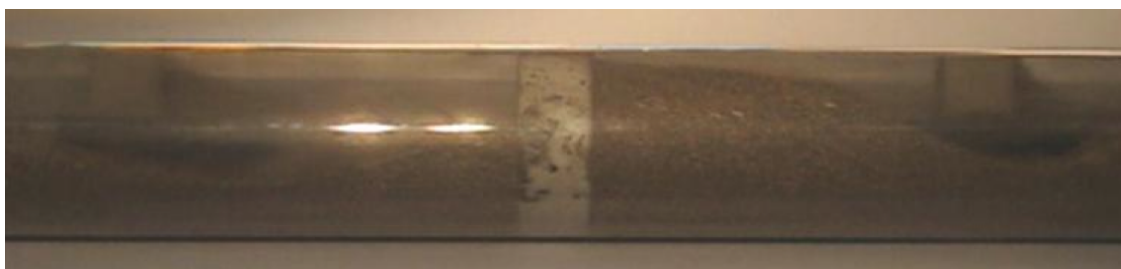
Para mejorar el mezclado de la biomasa se somete el rascador a un movimiento alternativo, alterando el patrón de flujo observado. Lo comentaremos más en profundidad en la sección 4.5.

#### **4.2.2 Biomasa en forma de paja molida**

Las siguientes imágenes ilustran el flujo de biomasa en el interior del reactor tubular cuando incrementamos el caudal de aire. Igual que en los apartados anteriores el flujo de biomasa va de derecha a izquierda.



**Imagen 4.7. Paja molida – Caudal de aire 10 kg/h.**



**Imagen 4.8. Paja molida – Caudal de aire 20 kg/h.**



**Imagen 4.9. Paja molida – Caudal de aire 30 kg/h.**

El patrón de flujo de la paja molida es comparable con el de los pellets de madera. Podemos observar en las fotografías, que la paja molida muestra, al igual que los pellets de madera dos fases bien distintas. Era de esperar que la paja molida tuviera solo una fase debido a su baja densidad (comparándola con los pellets de madera) y el menor número de Stokes asociado. El número de Stokes determinado para el cambio de condiciones lo comentaremos más adelante en este documento. El flujo de paja molida muestra un comportamiento similar a los pellets de madera con los caudales de aire más bajos. Esto era de esperar debido a la baja densidad y pequeñas dimensiones de la paja molida en comparación con los pellets.

La investigación no incluye mayores valores de flujo de aire que asegurarían que toda la biomasa está en la fase suspendida. A un caudal de aire alto el flujo de biomasa sería muy alto, esto tendría como consecuencia un tiempo de residencia muy corto. Si bien la biomasa en forma de paja molida tiene un tamaño de partícula pequeño y una baja densidad esto significa que la reacción de descomposición tendría lugar en un tiempo menor, elevar el caudal de aire a valores más altos que los investigados no sería conveniente para esta aplicación.

Los resultados y observaciones obtenidos para la paja molida son muy poco fiables. El caudal de biomasa en el reactor no ha sido uniforme durante los ensayos debido a que las partículas de biomasa forman puentes y se adhieren en el interior de la tolva de alimentación. El problema descrito fue previamente comentado en el apartado 2.3.3, donde se empleó un sistema de agitación. Desgraciadamente estos experimentos se han completado sin mecanismo de agitación lo cual ha dado como resultado un flujo de biomasa no uniforme. La imagen 4.10 muestra la formación del puente en la tolva de alimentación se puede comprobar que debajo del puente el tanque está vacío. La figura 4.11 muestra la adherencia de las partículas de biomasa a las paredes de la tolva. Estos han sido los dos grandes problemas en los ensayos experimentales realizados con la biomasa en forma de paja molida causando una alimentación irregular y no uniforme produciendo resultados poco fiables.



**Imagen 4.10. Puente formado en el tanque de alimentación de biomasa.**



**Imagen 4.11. Biomasa adherida a las paredes del tanque de alimentación.**



#### **4.2.2.1 Variación en el tubo de reacción**

Se usan varias reducciones para adaptar el diámetro de la tubería de alimentación al reactor.



**Imagen 4.12. Reducciones en la alimentación de biomasa.**

Las reducciones situadas en el tubo de alimentación de biomasa ofrecen sitios adicionales para que la biomasa forme puentes y adherencias. Esto ocasiona más problemas en el flujo de biomasa hacia el reactor tubular y dificulta la obtención de resultados experimentales de posibles observaciones.

#### **4.3. Caudal de biomasa**

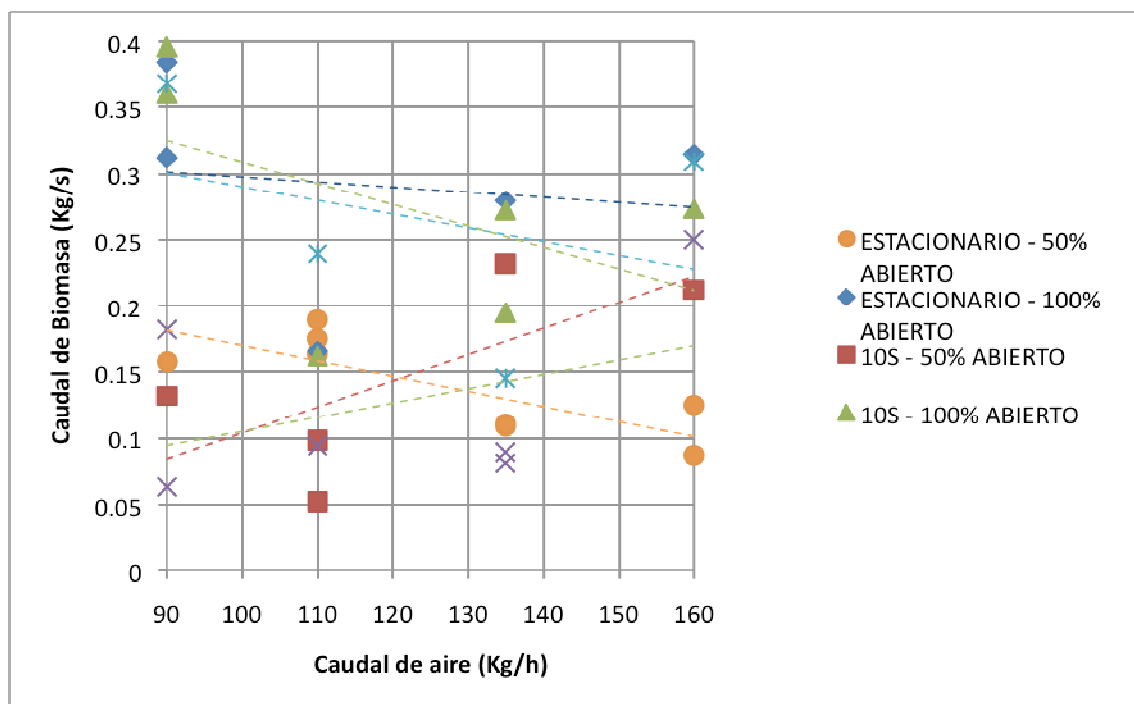
El caudal de biomasa se calculó, cronometrando la duración del ensayo y pesando la masa de biomasa recogida en el recolector situado al final de reactor.

##### **4.3.1 Pellets de biomasa**

En el presente ensayo experimental analizamos la variación de la velocidad del flujo de biomasa, en forma de pellets de madera, en función del caudal de aire, teniendo como variables del ensayo los diferentes periodos de movimiento del rascador y el porcentaje de apertura de la válvula de alimentación del reactor.

Los resultados obtenidos en el mismo quedan reflejados en la tabla incluida en el Apéndice VI.

Para una mejor y más rápida comprensión de los resultados, procedemos a representar estos datos obtenidos en el gráfico siguiente:



**Gráfico 4.13 Caudal pellets de biomasa**

Los símbolos que identifican los puntos del gráfico hacen referencia tanto al periodo de movimiento del rascador como al porcentaje de apertura de la válvula (Ejemplo: '10s – 100%' hace referencia a un flujo de biomasa obtenido para unas variables del ensayo de 10 segundos para el periodo del rascador y un porcentaje de apertura de la válvula de alimentación al reactor del 100%).

Analizando la representación de los resultados obtenidos en los ensayos podemos comprobar cómo tendencia general que,

- A mayor caudal de aire se obtiene un aumento del caudal de biomasa.

Este hecho se debe a que la biomasa se encuentra suspendida en la corriente de aire, por lo que el aumento del primero llevará implícito el aumento de la segundo.

- El incremento de la velocidad del flujo de biomasa aumenta en función de la fracción de biomasa en la fase suspendida.

Como ya se explico en un apartado anterior, un incremento en la velocidad de flujo de aire hace que aumente la fracción de biomasa en la fase suspendida y disminuya la fracción de biomasa acumulada en el fondo del reactor.



El cálculo del caudal de aire se realizó en función del flujo de biomasa suspendida; de modo que el flujo de biomasa se incrementa si la cantidad de biomasa suspendida es mayor.

- Se obtiene un mayor flujo de biomasa cuando la válvula de alimentación está totalmente abierta en comparación con el flujo de biomasa obtenido cuando la válvula de alimentación está abierta al 50%, como se puede comprobar en el gráfico para periodos del rascador de 5s y 10s.

Los datos registrados para el valor de la velocidad del flujo de biomasa son más altos con la válvula abierta al 100% para todos los caudales de aire.

- Un incremento en la velocidad del rascador hace disminuir la velocidad del flujo de biomasa.

Esto sugiere que la velocidad del rascador no tiene un efecto positivo sobre el flujo de biomasa como era de esperar.

El rascador favorece el mezclado de la biomasa en el interior del reactor cambiando el patrón de flujo, hecho que comentaremos más adelante.

- Los resultados obtenidos en los ensayos realizados con un caudal de aire de 90 kg/h no se ajustan a lo esperado para caudales de aire más altos.

Estos puntos no se han tenido en cuenta a la hora de analizar los resultados en el gráfico. Sin embargo, los puntos si están representados en el gráfico.

La biomasa en forma de pellets de madera tiende a romperse durante los ensayos experimentales y disminuyen considerablemente su tamaño, lo que podría afectar a los caudales de biomasa obtenidos.

- Los datos obtenidos en los ensayos realizados para un caudal de aire de 110kg/h, estando el rascador inmóvil y la válvula de alimentación de biomasa abierta al 50% tampoco siguen la tendencia general.

Los datos obtenidos sugieren que cuando el caudal de aire se incrementa, decrece el caudal de biomasa, lo que nos hace pensar que los datos del caudal de biomasa obtenidos para un caudal de aire de 110 kg/h son erróneos.

Los resultados de caudal de biomasa se encuentran entre 0,163 y 0,189 Kg/h, valores más altos que el 0,165 Kg/h obtenido para los ensayos realizados con la válvula abierta al 100% y el rascador fijo. De acuerdo con las tendencias observadas, deberíamos obtener valores más bajos.

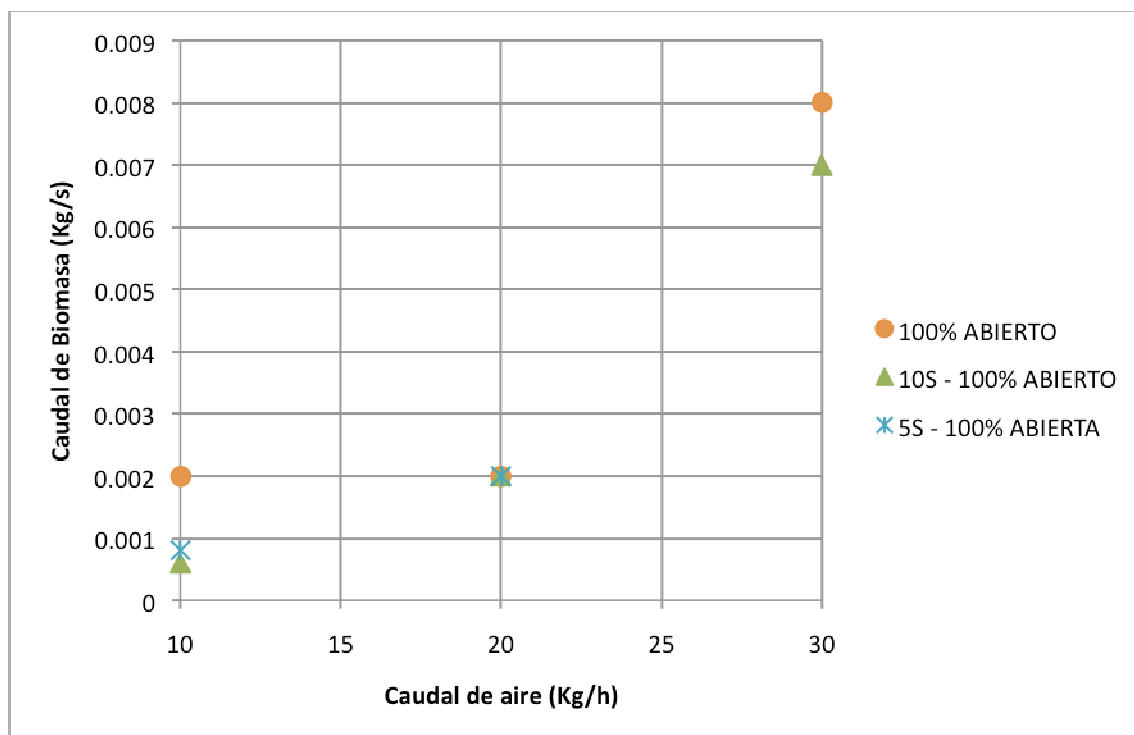
Estas anomalías pueden ser debidas a una combinación de errores en las medidas junto a un error humano, ya que estos ensayos fueron los primeros ensayos realizados.

#### 4.3.2 Biomasa en forma de paja molida

En este ensayo experimental analizamos la variación de la velocidad del flujo de biomasa en forma de paja molida, en este caso, en función del caudal de aire, teniendo como variables del ensayo, al igual que en el caso anterior, los diferentes periodos de movimiento del rascador y el porcentaje de apertura de la válvula de alimentación del reactor.

Los resultados obtenidos en el mismo quedan reflejados en la tabla del Apéndice VIII.

La representación gráfica de los datos obtenidos será:



**Gráfico 4.14 Caudal de paja molida.**

Analizando el gráfico obtenido a partir resultados de los ensayos podemos comprobar cómo tendencia general que:

- El caudal de aire tiene efectos similares sobre la biomasa en forma de paja molida a los observados en los pellets de madera.

Se observa la misma tendencia general que en el ensayo anterior, comprobándose que el caudal de biomasa se incrementa cuando aumenta el caudal de aire y disminuye con periodos cortos en el movimiento del rascador.

El flujo de paja molida no es uniforme, por lo que no ha sido posible realizar diferentes ensayos para diferentes velocidades de alimentación.

No se han podido obtener datos del ensayo para las condiciones de caudal de aire de 30 kg/h y un periodo de rascador de 5 segundos.

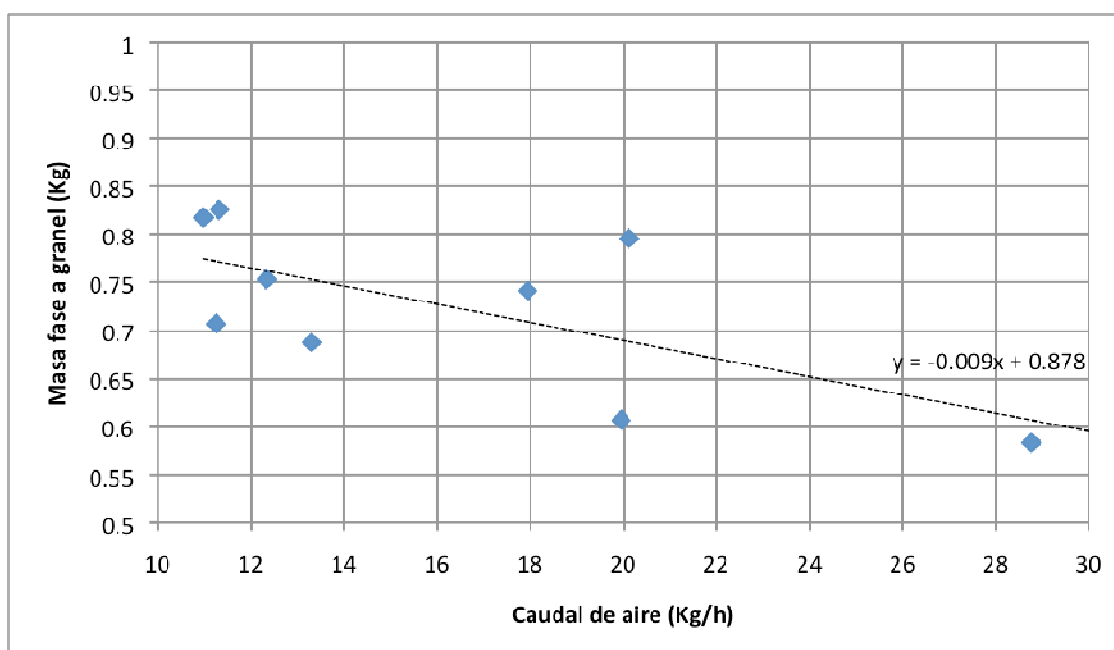
El puente formado en la tolva de alimentación y la adherencia provocada por la paja molida en la tolva hicieron el ensayo inviable, no pudiendo obtenerse datos durante el ensayo.

#### 4.3.3 Fase de biomasa acumulada en el fondo del reactor

El método usado para calcular la velocidad de flujo de la biomasa solo tiene en consideración la biomasa en fase suspendida.

Durante los ensayos realizados con la paja molida, el número de ensayos realizados fue mayor, midiendo la biomasa acumulada en el fondo del reactor. En estos ensayos, se realizó también la medida del peso de paja molida que quedaba en el interior del reactor.

Esta medida adicional del peso en el interior del reactor no se realizó para los pellets de madera, por lo que no se puede determinar si las observaciones detectadas durante los ensayos con paja molida, serían similares en ambos tipos de biomasa.



**Gráfico 4.15 Masa de la fase a granel.**

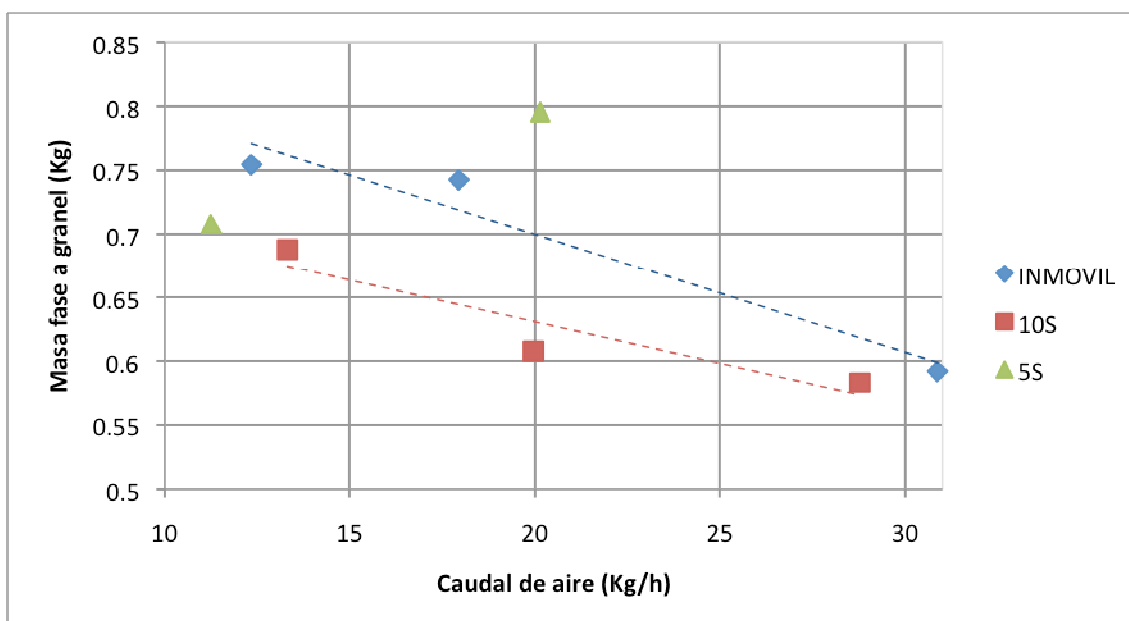
El gráfico muestra la cantidad de biomasa en función del caudal de aire, teniendo como variables del ensayo los diferentes periodos de movimiento del rascador.

En la evaluación de los resultados es evidente que la gama de mediciones de masa registrada es muy pequeña.

Los resultados sin embargo pueden ser interpretados con una ligera correlación negativa entre el caudal de aire y la cantidad de masa de biomasa acumulada en el fondo del reactor.

La ecuación obtenida a partir de los resultados obtenidos sugieren un gradiente asociado a la correlación de 0,0094.

A partir del gráfico no se puede ver claramente que variable afecta a la masa de biomasa acumulada en el fondo del reactor. En los gráficos 4.16. y 4.17. que se muestran a continuación podemos observar los efectos del caudal de aire y el periodo del movimiento del rascador sobre la masa acumulada en el fondo del reactor.



**Gráfico 4.16 Efecto del caudal de aire sobre la fase a granel de paja molida.**

El gráfico nos muestra como afecta el caudal de aire a la masa de biomasa acumulada en el fondo del reactor.

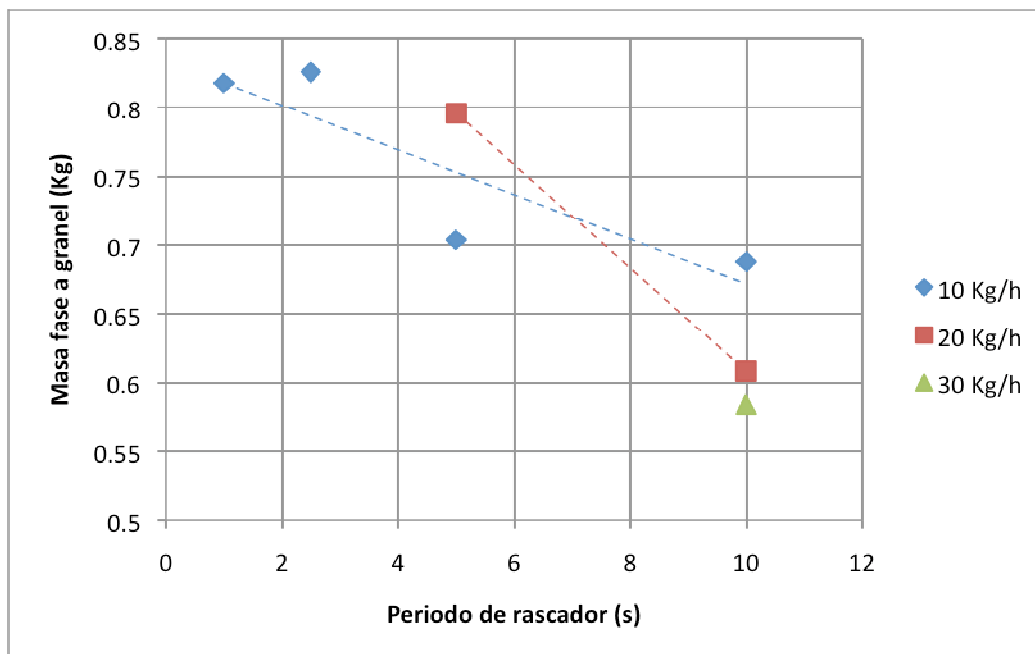
Como la tendencia general mostrada en el gráfico 4.15.

- La masa de biomasa acumulada decrece cuando aumenta el caudal de aire.

Esta tendencia ayuda a reforzar la teoría planteada de que existen dos patrones de flujo cuando las partículas de biomasa se transportan de forma neumática en la corriente de aire y que al incrementar el flujo de aire la cantidad de biomasa suspendida disminuye la biomasa acumulada en el fondo del reactor.

- El gráfico 4.16. muestra que el periodo del movimiento del rascador podría tener también un efecto sobre la biomasa, esto podemos observarlo mejor en el gráfico 4.17.

Los resultados para un periodo de 5s no siguen la tendencia general esto se puede deber a resultados erróneos asociados a las limitaciones del ensayo.



**Gráfico 4.17. Efecto del periodo del rascador sobre la masa de la fase a granel de paja molida.**

En el gráfico anterior podemos observar como el periodo del rascador también afecta a la masa de biomasa acumulada en el fondo del reactor.

- Al disminuir el periodo del rascador se incrementa la velocidad del rascador y también aumenta la masa de la biomasa acumulada en el fondo del reactor.
- Los datos obtenidos para el peso de la biomasa acumulada en el fondo del reactor también están de acuerdo con la tendencia mostrada a pesar de estar el rascador parado.

Estos valores son 0,754, 0,742 y 0,592 kg para caudales de aire de 10, 20 y 30 kg/h respectivamente, aunque los mismos no han sido incluidos en el gráfico.

Esto puede ser debido a la caída de presión que ocurre cuando aumentamos la velocidad del pistón.

Como la velocidad del rascador se incrementa lo hace también el factor de fricción de Fanning asociado.

La siguiente correlación describe el factor de fricción de Fanning asociado a la geometría empleada con flujo turbulento y asociado con el trabajo de Solano (2011).

$$f = \left[ C_1 \log \left( \frac{C_2}{Re} + \left( \frac{10}{C_1} \right)^{0.7} \right) \right]^{-2}$$

Donde:

$$\omega = \frac{V_{rsc}}{V_s}$$

El incremento en el valor del coeficiente de fricción de Fanning lleva asociado una mayor caída de presión, lo que provoca una mayor cantidad de biomasa acumulada en el fondo del reactor.

Esto podría sugerir que el movimiento alternativo del rascador no mejora el flujo neto de biomasa.

Por otro lado para altas velocidades del rascador (periodos pequeños) se requiere más consumo de energía en el sistema de bombeo para mantener una cierta velocidad de flujo de biomasa.

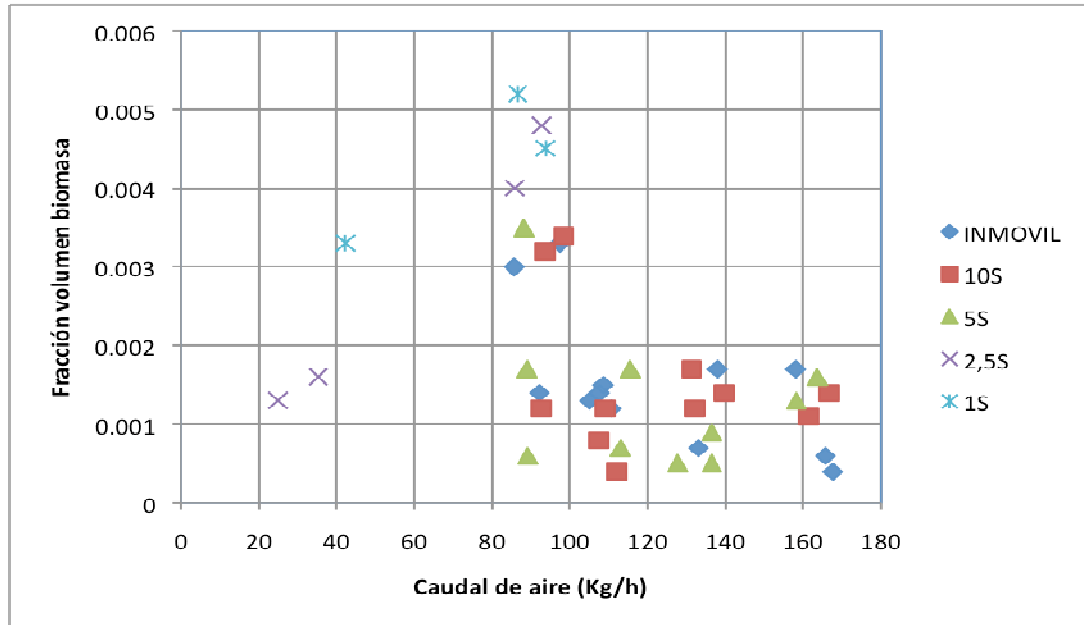
#### 4.4. Concentración de biomasa

Inicialmente se intentó determinar la concentración de biomasa como fracción del volumen de biomasa en aire, usando la siguiente ecuación:

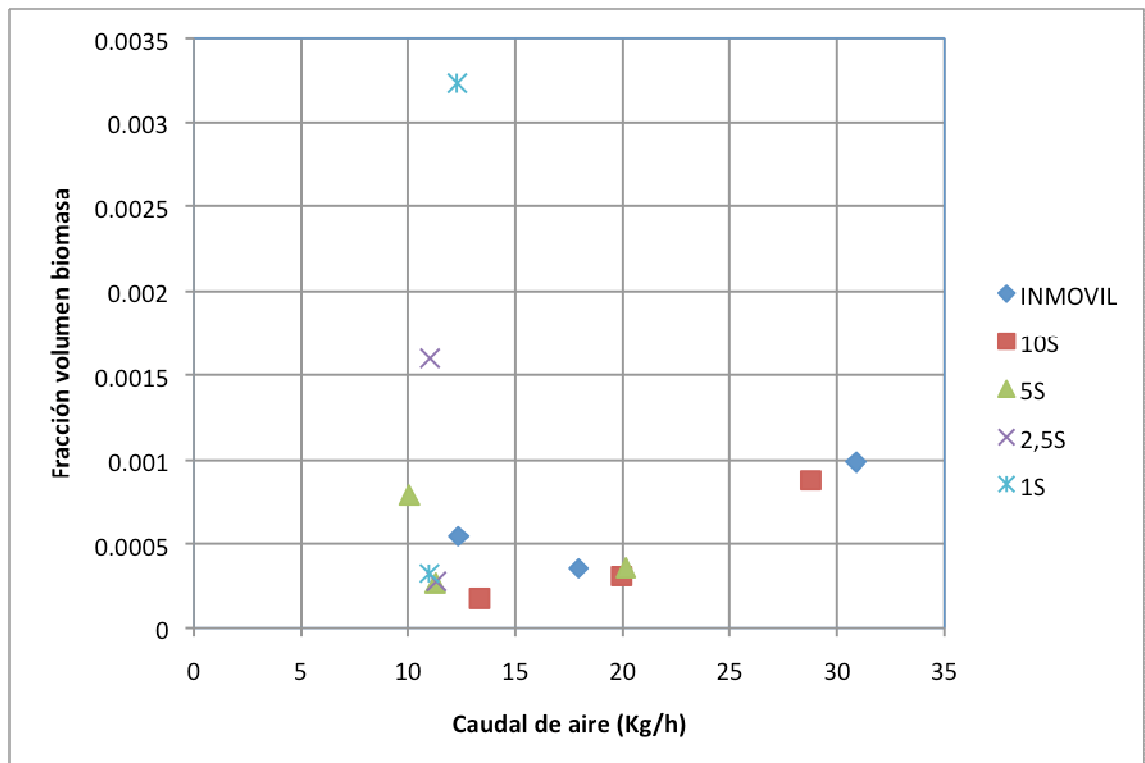
$$fracvol = \frac{m_a \rho_a}{m_a \rho_a + m_p \rho_p}$$

Los gráficos 4.18. y 4.19. muestran los resultados de los cálculos de fracción de volumen para pellets de madera y para paja molida respectivamente para los 5 periodos del movimiento del rascador ensayados.

En los apéndices 7 y 8 podemos encontrar los valores obtenidos para los dos tipos de biomasa. Estos valores son extremadamente bajos y no parecen mostrar ninguna correlación.



**Gráfico 4.18 Fracción en volumen de pellets de madera.**



**Gráfico 4.19 Fracción de volumen de paja molida.**

Una evaluación posterior determina que el uso de este método para calcular la concentración solo toma en consideración la biomasa que está presente en la fase suspendida. Esto confirma por que los valores obtenidos estaban siendo tan pequeños.

Como anteriormente se explico en la sección 4.3.3. la investigación se extendió para incluir las medidas de la masa de biomasa acumulada en el fondo del reactor para la paja molida. Se pensó que esta medida podría ser incluida en el flujo.

Debido a la existencia de dos patrones de flujo presentes, determinar la concentración de la biomasa es más difícil de lo que se pensó en un principio de los ensayos.

Se deberían considerar otros métodos para determinar la concentración de biomasa.

Zhen y Lio (2011) resumían una serie de técnicas para medir el flujo de masa y concentración en el transporte neumático de sólidos.

La tabla 4.3 muestra los métodos indirectos usados para determinar la concentración volumétrica de transporte neumático de sólidos.

Todos los métodos mencionados determinan la concentración de flujo midiendo una concentración volumétrica instantánea a través de la sección de la geometría en la cual esta fluyendo el sólido suspendido.

MÉTODO	TÉCNICA DE DETECCIÓN
Métodos eléctricos	Capacitivo Electrostático
Atenuación y dispersión	Rayo γ Microondas Óptica Acústica/ultrasonido
Resonancia	Magnética Microondas Acústica
Tomografía	Capacitativa / Resistencia Óptica Rayo γ
Imagen digital	Lasers y CCD

**Tabla 4.3. Medición de la concentración volumétrica de sólidos**

Se debe tener cuidado a la hora de seleccionar el método de medida de la concentración, su idoneidad con el sistema.

#### **4.5. Velocidad del rascador**

En los ensayos usando líquidos, se ha observado que un incremento en la velocidad del rascador conduciría a un mayor mezclado dentro del fluido.

Se han realizado investigaciones para comprobar si el efecto se da también en flujo sólido-gas, dando lugar a un patrón de flujo más uniforme.



#### 4.5.1 Biomasa: pellets de madera



**Imagen 4.20. Pellets de madera – Caudal de aire 90 kg/h – Rascador inmóvil.**



**Imagen 4.21. Pellets de madera – Caudal de aire 90 kg/h – Periodo del rascador 10 s.**



**Imagen 4.22. Pellets de madera – Caudal de aire 90 kg/h – Periodo del rascador 5 s.**



**Imagen 4.23. Pellets de madera – Caudal de aire 90 kg/h – Periodo del rascador 2.5 s.**

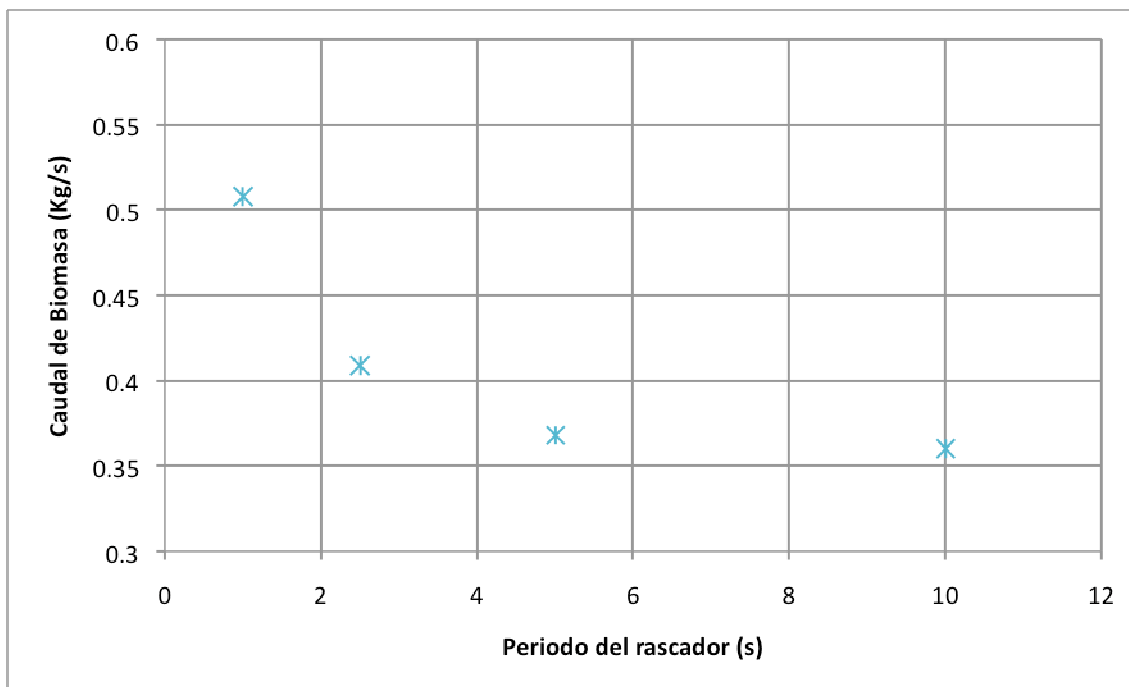


**Imagen 4.24. Pellets de madera – Caudal de aire 90 kg/h – Periodo del rascador 1 s.**

En las anteriores imágenes podemos observar el flujo de pellets de madera sometidos a un caudal de aire de 90 kg/h.

Las 5 imágenes representan los 5 periodos de movimiento del rascador que se han ensayado, desde el rascador parado imagen 4.20. hasta un periodo de un segundo en la imagen 4.24.

Se puede determinar muy poco a partir de las imágenes. Sin embargo, parece como si el flujo de materia suspendida este más concentrado a velocidades del rascador más lentas (periodos más altos). Se pude comprobar la validez de esta afirmación en el siguiente gráfico.



**Gráfico 4.25 efecto del periodo del rascador en el caudal de biomasa a 90 kg/h.**

El efecto del periodo del rascador en el flujo de biomasa con un caudal de aire de 90 kg/h se puede ver en el gráfico 4.25.:

- La tendencia sugiere que si el periodo del rascador disminuye, aumenta la velocidad. El flujo de biomasa y por lo tanto la cantidad de biomasa en la fase suspendida crecerá.
- Un análisis visual de los ensayos sugiere que las velocidades altas favorecen el mezclado de biomasa.

Se forma una fase de transición entre la fase de biomasa acumulada en el fondo del reactor y la fase suspendida, esto se ve favorecido con velocidades más altas del rascador.

- Las velocidades altas del rascador favorecen el mezclado de la biomasa en el interior del tubo. Esto nos lleva a una mayor cantidad de biomasa arrastrada por la corriente de aire y por lo tanto un aumento del caudal de biomasa.
- El movimiento alternativo del rascador ayuda a eliminar los puntos muertos que aparecen cerca de las palas del rascador.

Podemos observar que tanto en la parte frontal como en la trasera se acumula una cantidad de biomasa.

Sin embargo las partículas de biomasa están constantemente cambiando, la velocidad con lo que estas partículas son reemplazadas por otras se incrementa con la velocidad del rascador.

- También podemos observar que el patrón de flujo y el mezclado ocurren de manera diferente en función de que el movimiento del rascador sea a favor de corriente o contracorriente con el flujo del aire.

#### **4.5.1.1 Movimiento a favor de corriente**



**Imagen 4.26 Pellets de madera – Periodo del rascador 1s – movimiento a favor de corriente**

Cuando el rascador se mueve en la misma dirección que el flujo de biomasa, como podemos observar en la figura 4.26, la fase suspendida sigue un movimiento serpenteante entre los rascadores.

La biomasa acumulada en el fondo del tubo es empujada hacia adelante a lo largo del reactor por las palas del rascador a la misma velocidad que el movimiento alternativo.

#### **4.5.1.2 Movimiento a contracorriente**



**Imagen 4.27 Pellets de madera – Periodo del rascador 1s – movimiento a contracorriente.**

Cuando el movimiento del rascador es a contracorriente con el flujo de biomasa, como podemos ver en la figura 4.27, se fuerza el movimiento de la biomasa acumulada en el fondo del reactor.

Cuando el rascador inicialmente se mueve hacia atrás se forma un hueco en la parte delantera de la pala del rascador.

Cuando las palas del rascador se mueven hacia atrás, la corriente de aire y la fricción con el tubo aplican fuerzas opuestas a la pala, que provocan que la biomasa se mueva hacia arriba.

#### **4.5.2 Biomasa en forma de paja molida**

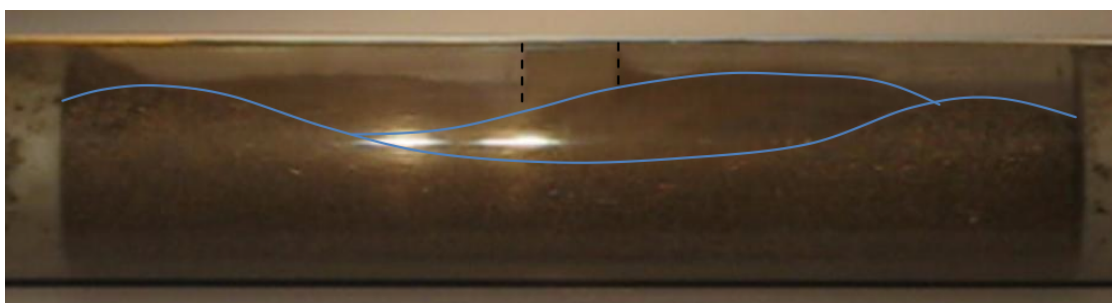
El periodo del rascador parece que no influye mucho en la paja molida cuando lo comparamos con los pellets de madera.

El reducido efecto de mezclado en el interior del reactor podría ser debido al pequeño tamaño de las partículas de paja molida cuando se compara con el diámetro del tubo.

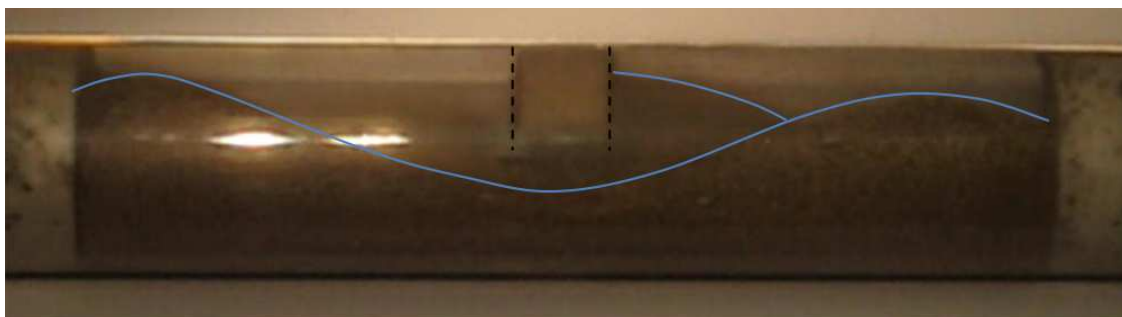
Aunque incrementar la velocidad del rascador no parece mejorar el mezclado, en las imágenes 4.28 a la 4.30 podemos observar como afecta a la forma y posición de la biomasa.

De la imagen 4.28 a la 4.30 podemos observar como la biomasa acumulada en el fondo del reactor, que está sometida a un caudal de aire de 30 kg/h, cambia con los diferentes periodos del rascador.

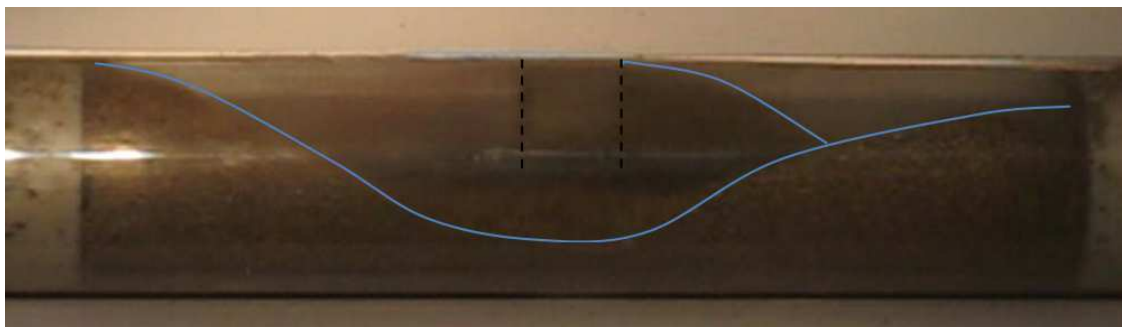
En las imágenes podemos observar una línea punteada en negro que indica la posición de la pala del rascador en el interior del tubo y una línea continua azul que indica la forma que toma la biomasa en el interior del tubo.



**Imagen 4.28 Paja molida – Caudal de aire 30 kg/h – rascador inmóvil**



**Imagen 4.29 Paja molida – Caudal de aire 30 kg/h – Periodo del rascador 10 s.**



**Imagen 4.30 Paja molida – Caudal de aire 30 kg/h – Periodo del rascador 5 s.**

Podemos observar que cuando el rascador esta inmóvil el perfil de la biomasa acumulada es bastante plano entre las palas del rascador.

En cambio, cuando el rascador esta en movimiento, el perfil de la biomasa cambia. Hay acumulación de biomasa delante y detrás de las palas del rascador, el nivel de biomasa decrece a un mínimo en la zona opuesta a la posición de la pala del rascador.

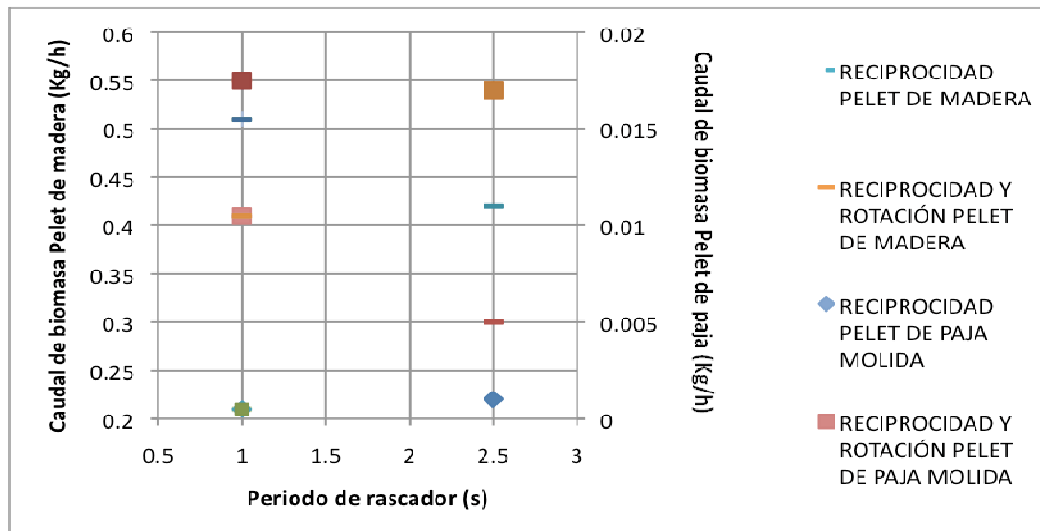
La variación del nivel crece con la velocidad del rascador (periodos cortos del movimiento).

#### **4.5.3 Rotación del rascador**

Observamos que dándole un movimiento de rotación al rascador se mejora el mezclado de la biomasa y se produce un incremento neto en el flujo.

Durante el movimiento de rotación, el rascador también actuó rompiendo la biomasa acumulada en el fondo del reactor.

Podemos observar este efecto en el gráfico 4.31. El caudal de biomasa muestra un incremento cuando el rascador tiene un movimiento de rotación añadido al movimiento alternativo.



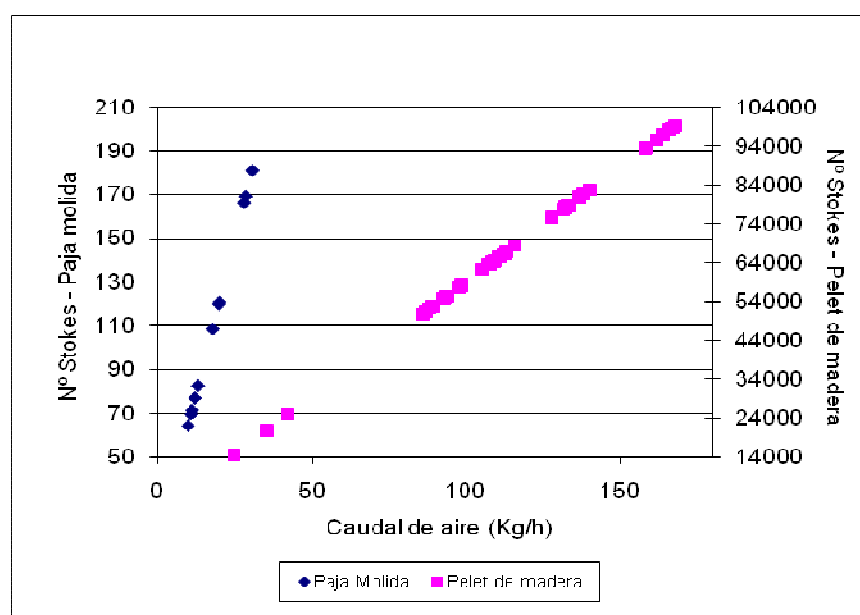
**Gráfico 4.31 Efecto de la rotación del rascador sobre el caudal de biomasa.**

El caudal de la biomasa en forma de pellets de madera se incrementa ligeramente en función del periodo del rascador, de tal modo que con un periodo del rascador de 1s, se obtiene un factor de 1,08 y con un periodo de rascador de 2,5s se incrementa por un factor de 1,32.

Podemos observar que, la rotación del rascador tiene un efecto mucho mayor en el caudal de paja molida, que se incrementa con un factor de 5,5 en un periodo de 2,5s y un factor de 10 en un periodo de 1 s.

#### 4.6. Número de Stokes

En el gráfico 4.32 podemos ver los números de Stokes calculados para los tipos de biomasa a los distintos caudales de aire usados en los ensayos.



**Gráfico 4.32 Número de Stokes en función del caudal de aire.**

Si realizamos una comparación directa entre los dos números de Stokes calculados para los dos tipos de biomasa, observamos que, el caudal de aire tiene un efecto mayor sobre la paja molida que sobre los pellets de madera. Estos resultados están de acuerdo con lo que se esperaba.

El número de Stokes calculado para la biomasa, en forma de pellets de madera, es más alto que el calculado para la paja molida. La paja molida genera un rango de número de Stoke entre 64 y 198 para caudales entre 10,04 y 30,88 kg/h respectivamente.

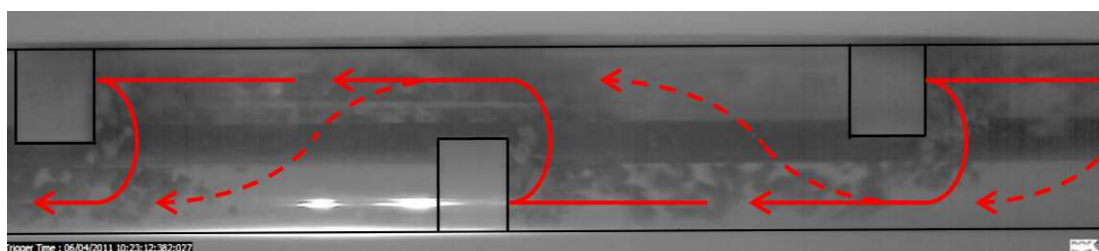
El considerablemente alto número de Stoke calculado para los pellets de madera puede ser debido al alto caudal de aire necesario para el transporte de biomasa.

Se realizaron algunos ensayos con pellets de madera para caudales de aire más bajos y se comprueba que los números de Stoke calculado en estos ensayos son significativamente mayores que los número de Stoke calculados para los mismos caudales con la paja molida.

Con un caudal de aire de aproximadamente 30 kg/h el número de Stokes es de 198 para la paja molida y de 18000 para los pellets de madera. Esta diferencia tan alta en el cálculo del número de Stokes para los dos tipos de biomasa se puede deber al tamaño y a la densidad de las partículas de biomasa.

Los pellets de madera tienen una densidad mayor comparando con la paja molida, lo que explica esta disparidad.

Los altos números de Stokes asociados a los pellets de madera sugieren que el cambio en el patrón de flujo del caudal de aire no afecta al patrón de flujo de la biomasa suspendida y que las partículas continúan su trayectoria original. En el reactor el rascador proporciona muchos obstáculos para que se produzcan colisiones.



**Imagen 4.33 Camino seguido por los pellets de madera a caudales altos de aire.**

La imagen 4.33 muestra el camino seguido por los pellets de madera con altos caudales de aire.

La línea roja discontinua indica el camino seguido por el caudal de aire y la línea roja continua indica el camino de las partículas de biomasa suspendida. Las líneas negras indican la posición de las palas del rascador y el tubo.

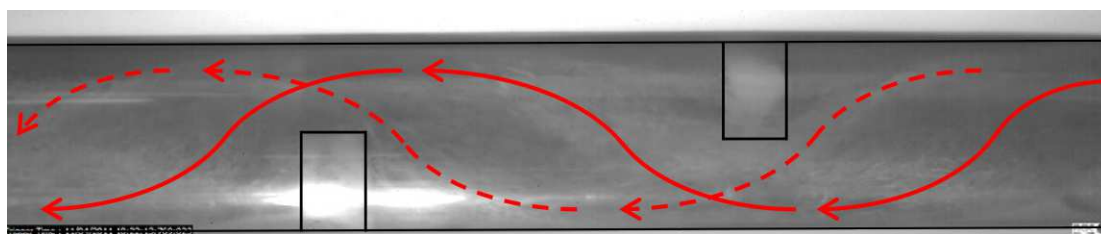


Las partículas de biomasa suspendida viajan a lo largo del tubo con una trayectoria recta chocando con las palas del rascador que encuentra en su camino.

El impacto de las partículas de biomasa con las palas del rascador tiende a romperlas causando en la formación de grandes cantidades de polvo.

Las partículas de paja siguen el camino de la corriente de aire en mayor grado que los pellets de madera. Esto lo podemos observar en la imagen 4.34 la línea roja continua y la línea roja discontinua indican el camino seguido por las partículas suspendidas de biomasa.

Al igual que en la figura anterior la línea negra continua indica la posición de las palas del rascador y de la pared interior del reactor.



**Imagen 4.34 Camino seguido por la paja molida a caudales altos de aire.**

El número de Stokes se calculó usando el diámetro hidráulico asumiendo que el flujo de aire ocupa toda la sección.

Como ya se comentó previamente los dos tipos de biomasa usada en los ensayos experimentales mostraron dos fases,

- Una fase de biomasa que se acumulaba en el fondo del reactor, que se encuentra relativamente inmóvil ocupando una parte del área de paso en el reactor, y
- Otra fase de biomasa suspendida en la corriente de aire.

El número de Stokes debería haber sido calculado de una forma más precisa tomando en consideración la fracción de área disponible para el paso del aire.

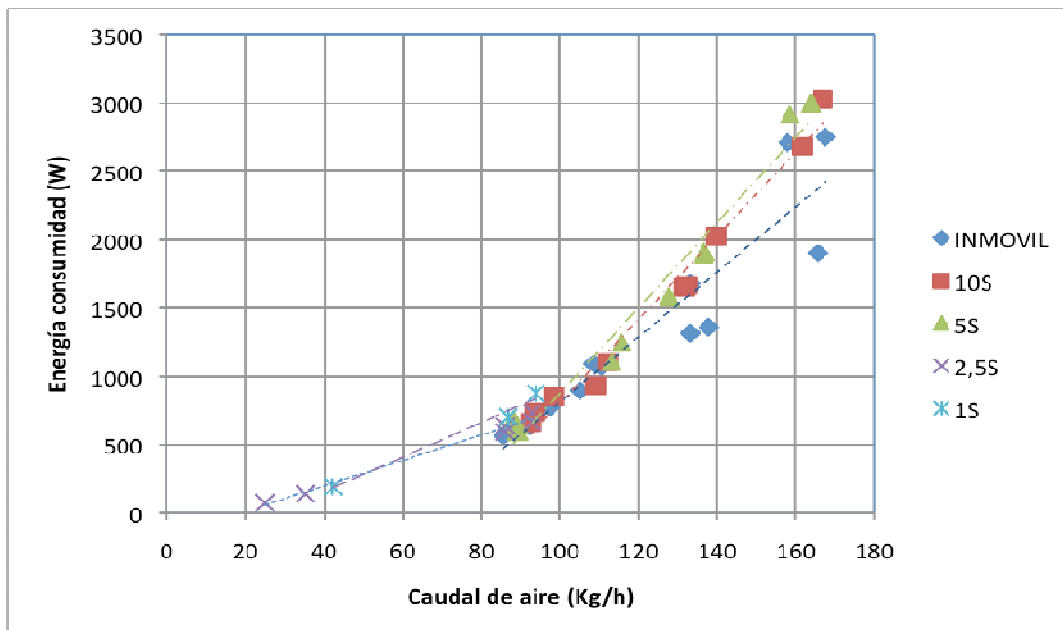
Evaluando la ecuación para el número de Stokes y la ecuación de velocidad con respecto al caudal másico, ecuaciones 3.11. y 3.6. respectivamente, sabemos que la velocidad es inversamente proporcional a la sección, por lo tanto, si el área disponible para el paso de aire decrece la velocidad se incrementa.

Como el número de Stokes es proporcional a la velocidad esto dará como resultado un número de Stokes más alto.



#### 4.7. Consumo energético.

##### 4.7.1 Biomasa en forma de pellets de madera.



**Gráfico 4.35 consumo energético con los pellets de madera.**

El consumo de energía del sistema cuando está sometido a cambios en el caudal de aire y cambios en el periodo del movimiento del rascador lo podemos observar en la imagen 4.35.

Los datos para el rascador inmóvil y con un periodo de 10 y 5 segundos se generan usando un pistón y los periodos de 2,5 y 1 segundo usando un segundo pistón.

Hemos observado que para los 5 diferentes periodos ensayados en el movimiento del rascador hay una tendencia común:

- Cuando se incrementa el caudal de aire se incrementa también el consumo energético.

El consumo energético en los ensayos experimentales se compone de dos partes:

- La energía consumida por el rascador y
- La energía consumida por el caudal de aire.

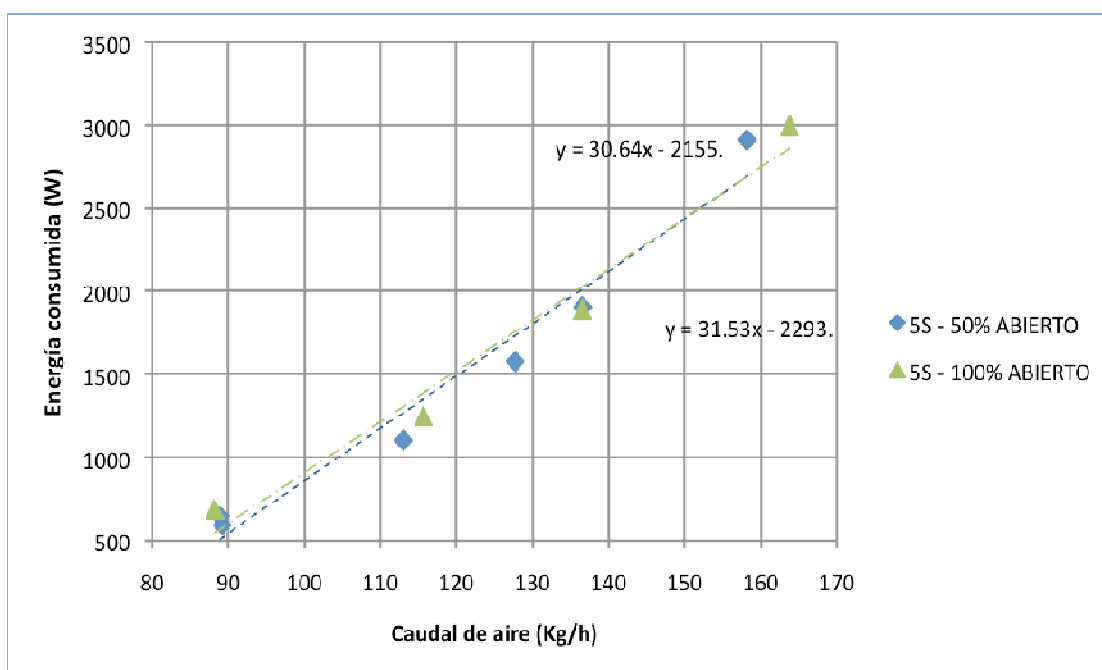
Cuando el caudal de aire se incrementa, se produce un aumento en el consumo energético y por lo tanto en el consumo energético total.

Otra observación que podemos realizar sobre la figura 4.35 es que, la energía consumida se incrementa cuando el periodo del rascador decrece (aumenta la velocidad). Para disminuir el periodo del rascador se produce un incremento de presión en el pistón y esto consume una gran cantidad de energía.

Las fuerzas que el pistón tiene que superar son las debidas a la fricción entre las palas del rascador y la pared interior del reactor.

En la Figura 4.36 podemos ver que la biomasa en el reactor también tiene un ligero efecto en el consumo de energía del pistón.

En el gráfico podemos observar que considerando el mismo periodo en el rascador y variando la apertura de la válvula, el consumo energético es algo más elevado cuando la válvula de alimentación de la biomasa está totalmente abierta que cuando está abierta al 50 %.



**Gráfico 4.36 Consumo energético con pellets de madera y un periodo en el rascador de 5s.**

El gradiente de la ecuación obtenida con los datos calculados con la válvula de alimentación de biomasa al 50 % es ligeramente mayor que la generada con la válvula totalmente abierta. Esto, ligeramente, sugiere que el efecto descrito es mas notable con caudales mas bajos.

A bajos caudales de aire, la diferencia entre los valores de consumo energético es mayor que a caudales de aire más altos. Esto podría ser debido a la mayor cantidad de biomasa acumulada en el fondo del tubo.

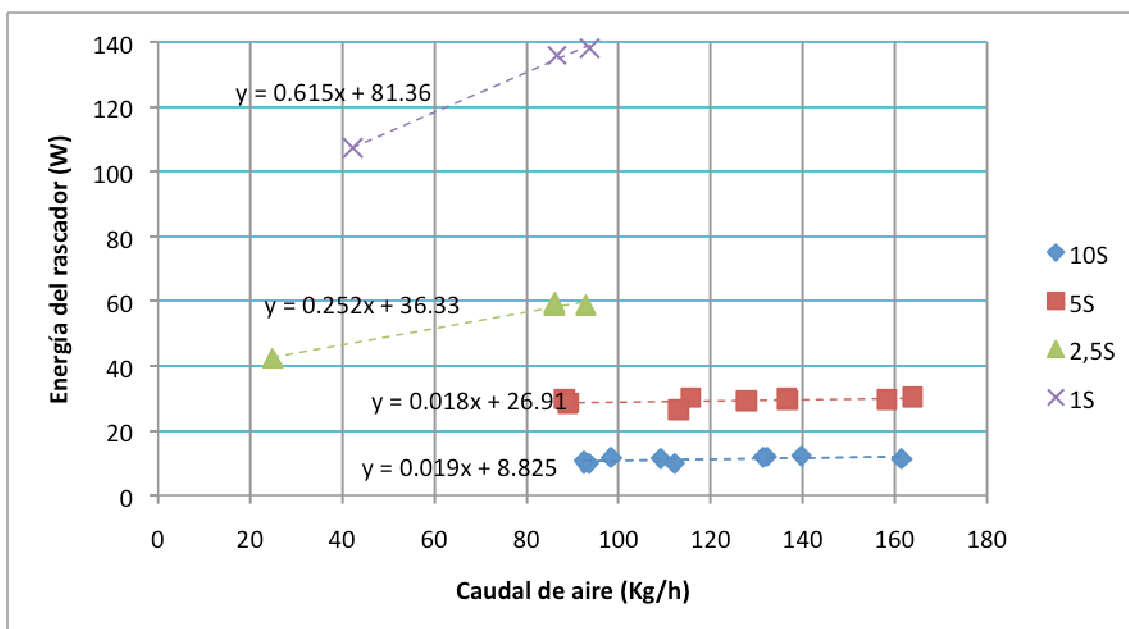
#### 4.7.1.1 Energía consumida por el rascador

El gráfico 4.37 muestra como un incremento en el caudal de aire también incrementa el consumo energético del rascador. Los gradientes asociados a las ecuaciones obtenidas a partir de los datos corroboran esto.

Los gradientes de las líneas de tendencia se incrementan con los periodos cortos del rascador, con la excepción del periodo de 5s. Esto puede ser debido a discrepancias en los ensayos.

Por lo tanto, esto sugiere que, la energía consumida por el rascador aumenta cuando el movimiento alternativo tiene periodos más cortos.

Este resultado también se puede explicar porque los periodos largos 5 y 10 segundos se determinan usando un pistón y en los periodos cortos 2,5 y 1 segundo se usa un segundo pistón.



**Gráfico 4.37 Consumo energético del rascador en función del caudal de aire**

Los gráficos 4.38 y 4.39, muestran la caída de presión de aceite en el pistón, medida durante el movimiento a favor de corriente y contracorriente.

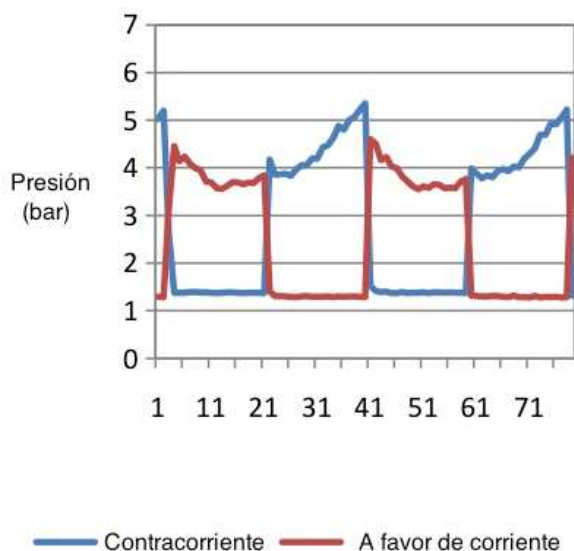
Destacan, la diferencia en las medidas de presión a diferentes caudales de aire, el periodo del movimiento del rascador constante a 5 segundos aunque la presión medida en ambos casos es similar,

La presión de aceite medida en el movimiento a contracorriente es mayor cuanto más alto es el caudal de aire.

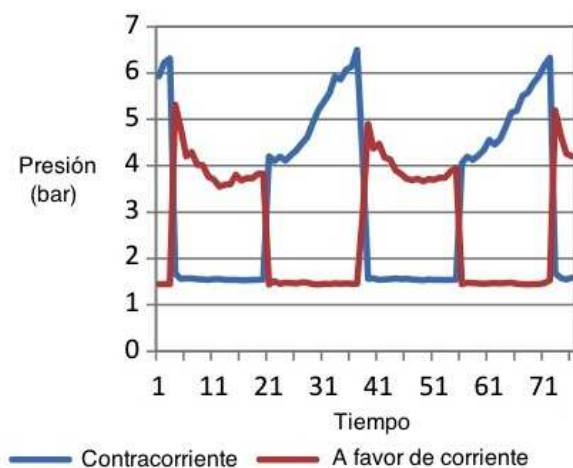
El movimiento a contracorriente incrementa la presión de aproximadamente 4 bares a aproximadamente 5,3 bares.

Cuando el caudal de aire es de 90 kg/h, sin embargo, cuando el caudal de aire se eleva a 160 kg/h la presión alcanza aproximadamente 6,4 bares.

La alta presión que se requiere para un movimiento a contracorriente del rascador incrementa el consumo energético del rascador para caudales de aire altos.

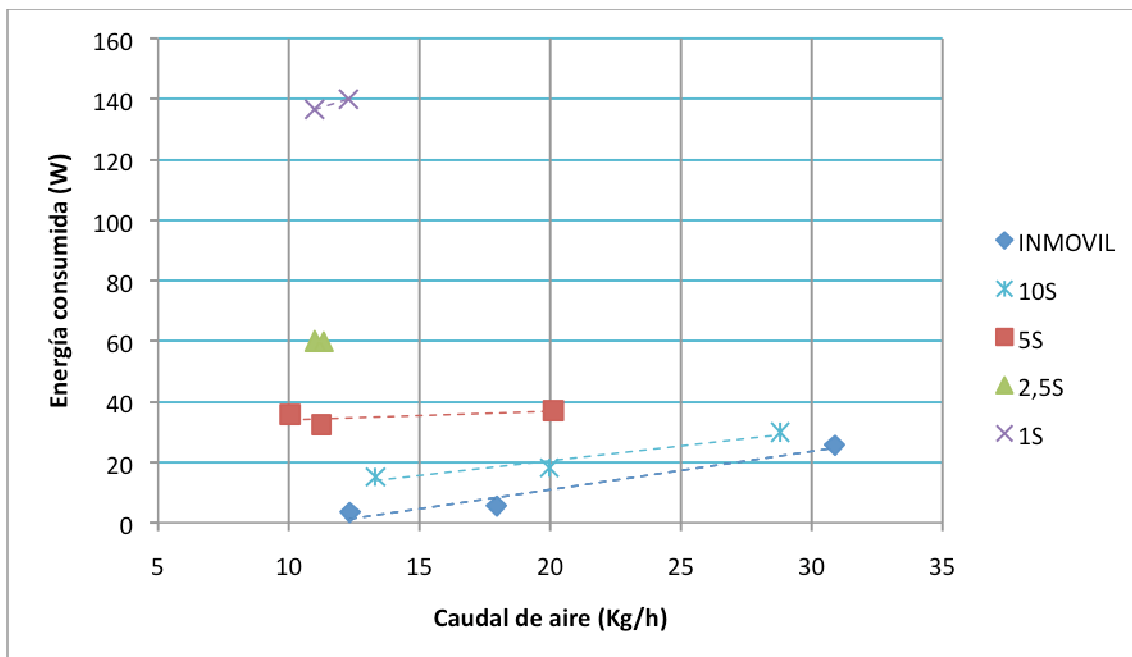


**Imagen 4.38 Señal de presión para un periodo del rascador de 5s con un caudal de aire de 90 kg/h.**



**Imagen 4.39 Señal de presión para un periodo del rascador de 5s con un caudal de aire de 160 kg/h.**

#### 4.7.2 Paja molida:



**Gráfico 4.40 Consumo energético con paja molida.**

En el gráfico podemos observar el efecto que produce el caudal de aire y el movimiento del rascador en el consumo energético, cuando usamos biomasa en forma de paja molida.

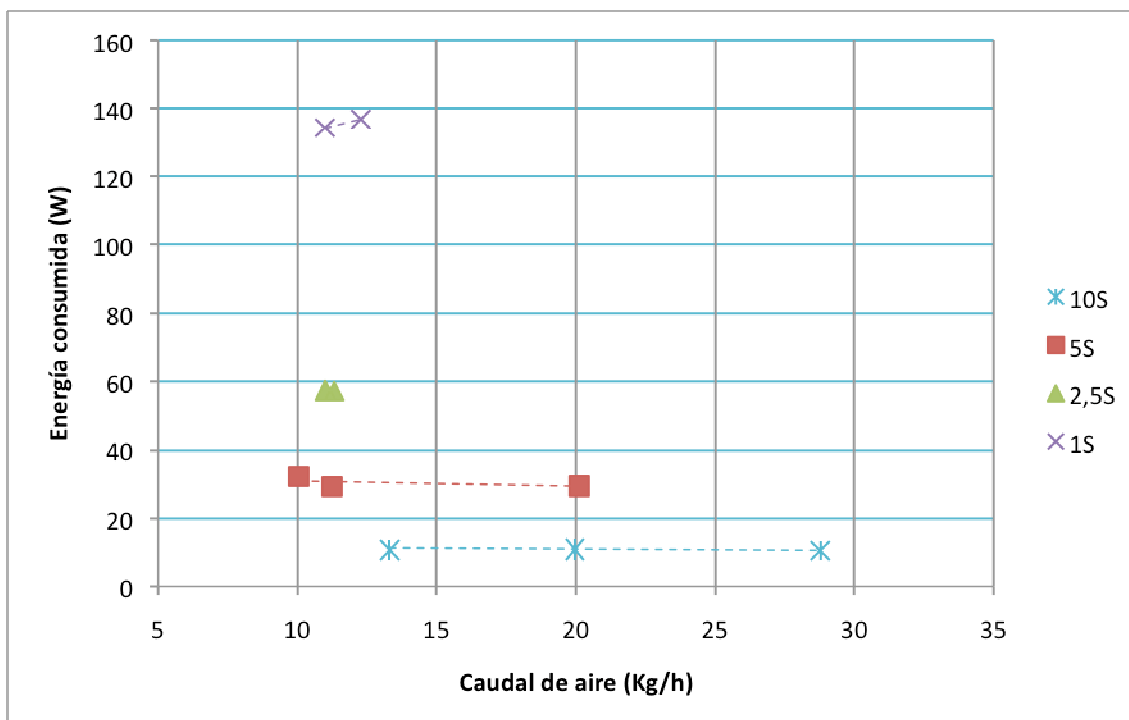
Se comprueba que el consumo energético se incrementa cuando se aumenta el caudal de aire y cuando decrece el periodo del rascador.

Las tendencias mostradas en el gráfico son comparables a los observados para la biomasa en forma de pellets de madera.

Los datos para un periodo del rascador de 2,5 segundos, aunque siguen la tendencia general cuando disminuye el periodo del rascador, no siguen la tendencia cuando se incrementa el caudal de aire. Esto provoca que el consumo energético para el caudal de aire sea mayor, lo que incrementa el consumo de energía global del ensayo

##### 4.7.2.1 Consumo energético del rascador

En el gráfico 4.41 observamos el efecto del caudal de aire y del periodo del rascador en el consumo energético.



**Gráfico 4.41 consumo energético en función del caudal de aire con paja molida.**

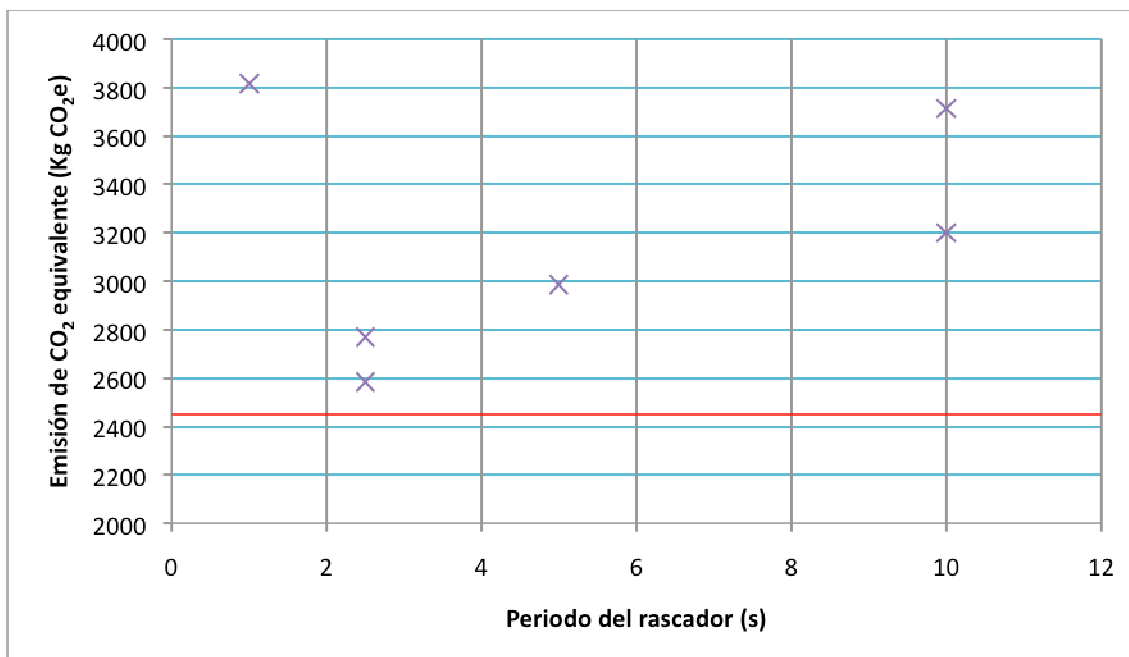
Podemos comprobar que, el consumo energético del rascador apenas se ve afectado por el caudal de aire para periodos grandes del rascador, a diferencia de lo que sucedía con los pellets de madera.

No podemos determinar si el caudal de aire tiene un efecto en la energía consumida por el rascador para periodos cortos del rascador, como resultado se determinan solo para un caudal de aire.

Por lo tanto, la diferencia en el consumo energético del rascador no puede ser comparado para los dos pistones.

#### **4.8. Emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>**

El gráfico 4.42 muestra el efecto del periodo del rascador en emisiones del CO<sub>2</sub> asociado a la biomasa en forma de pellets de madera, cuando está sometido a un caudal de aire 90 kg/h.



**Gráfico 4.42 Emisiones de CO<sub>2</sub> en función del periodo del rascador con pellets de madera y un caudal de aire de 90 kg/h.**

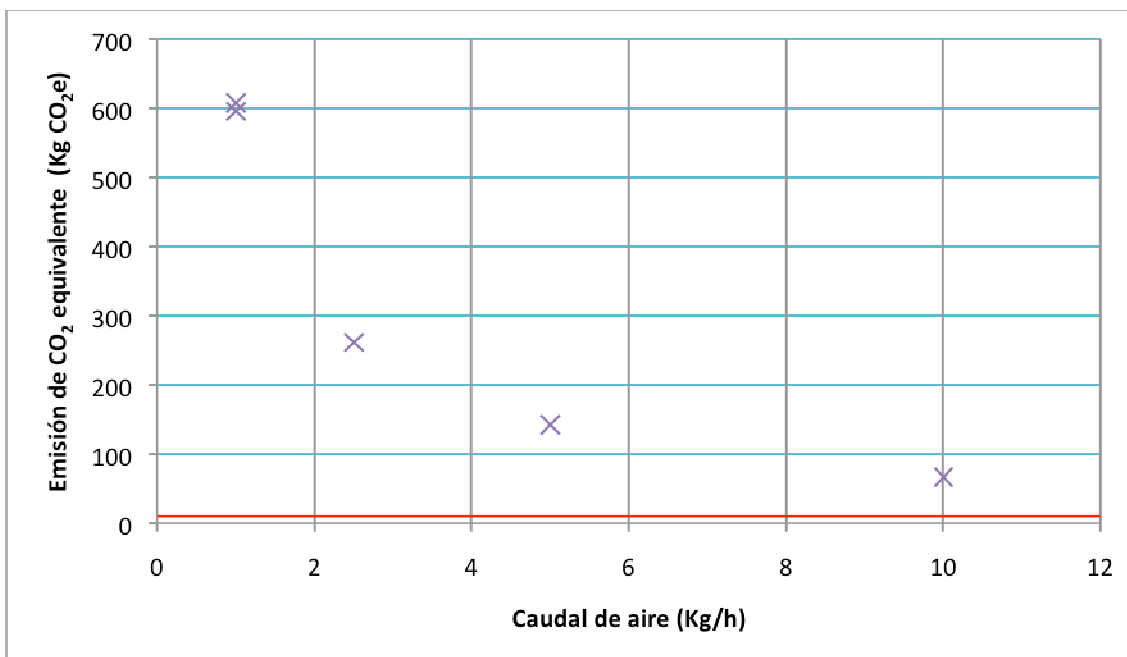
La línea roja representa la equivalencia en emisiones de CO<sub>2</sub> asociado al consumo energético requerido para un caudal de aire de 90 kg/h. Este valor es aproximadamente de 2450 kg de CO<sub>2</sub> emitido por año.

El gráfico no muestra una correlación obvia entre el periodo del rascador y el equivalente de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Los datos sugieren que, para un periodo del rascador de 1 segundo, periodo que nos da el mejor mezclado a la biomasa, el equivalente de emisiones de CO<sub>2</sub> se incrementa por un factor de 1.5 cuando lo comparamos con un sistema sin rascador.

Tenemos que considerar si el efecto positivo que tiene el movimiento alternativo del rascador en el mezclado de la biomasa es lo suficientemente importante para compensar las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Esto debe ser considerado más tarde cuando también tomemos en consideración rendimiento y eficiencia.



**Gráfico 4.43 Emisiones de CO<sub>2</sub> en función del periodo del rascador para un caudal de aire de 10 kg/h y paja molida.**

La figura 4.43 muestra las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente en función del periodo del rascador asociado a la biomasa en forma de paja molida y un caudal de aire de 10 kg/h.

La línea roja representa las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente asociada con la energía consumida para un caudal de 10 kg/h.

Este valor es aproximadamente de 15 kg de CO<sub>2</sub> por año.

El gráfico sugiere que hay una correlación exponencial negativa entre la equivalencia de CO<sub>2</sub> emitido y el periodo del rascador.

Podemos observar que los periodos cortos del rascador proporcionan un mejor mezclado de la biomasa. Sin embargo, este caso, si el periodo del rascador es de 1s, el equivalente de emisiones de CO<sub>2</sub> se incrementa por un factor de 40 como opuesto a no usar rascador.

Si utilizamos un periodo más largo en el movimiento del rascador, las emisiones se reducen considerablemente.

Nuevamente, el efecto del movimiento alternativo del rascador y la magnitud de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente tiene que estar en equilibrio.



#### 4.9. Condiciones óptimas

Las condiciones óptimas para el flujo usando transporte neumático se resumen en la tabla 4.4

	Pellets de madera	Paja molida
Caudal de aire (kg/h)	90	10
Periodo del rascador	1	1
Apertura válvula alimentación de biomasa	Full	Full

**Tabla 4.4 condiciones optimas.**

#### 4.10. Limitaciones de los ensayos

Señalamos a continuación algunas limitaciones que se han encontrado a la hora de realizar los ensayos.

En los ensayos realizados, no fue posible mantener un caudal de biomasa uniforme debido a varias razones:

- La válvula de bola que se ha empleado no es la adecuada para este tipo de ensayo y no permite realizar un correcto control de caudal.
- La falta de una esclusa de aire en la válvula de alimentación de la biomasa también permite un retorno de flujo de aire, lo que provoca una retención de la biomasa dentro de la tolva, lo que afecta al flujo de la biomasa.
- Los puentes que forma la biomasa en la tolva de alimentación, así como la adherencia de la paja molida, causan intermitencia en el flujo y en algún caso no hay flujo.
- Una limitación importante radica en el hecho de que hay una falta de repetitividad en la experimentación.
- Debido a las restricciones de tiempo los ensayos experimentales no se repitieron y por lo tanto los resultados no han sido validados.
- El caudal de aire no se ha podido mantener constante durante los ensayos debido a inevitables fluctuaciones en la compresión. Esto añadido a la posición del sensor de presión, justo aguas arriba de la válvula de control, da lugar a imprecisiones en el cálculo del consumo de energía.
- El estudio no analiza con precisión la concentración de la biomasa debido a la falta de equipo apropiado. También surgieron dificultades debido a las dos fases que mostraba el flujo de biomasa.

## 5. Modelado de flujo

Realizamos el modelado del sistema usando CFD software para poder realizar la comparación con los resultados de los ensayos experimentales. El modelo incluirá la simulación de los patrones de flujo de aire, mezcla aire / pellets de madera y mezcla aire / paja molida. Realizaremos la simulación de los patrones de flujo en el interior del reactor tubular sin rascador y en el interior del reactor tubular con el rascador en su interior. El modelo de simulación de flujo se completará usando ANSYS Workbench, usaremos FLUENT para modelar el flujo.

### 5.1. Geometría y malla

Realizamos dos geometrías para el modelado, reactor tubular sin rascador y reactor tubular con el rascador en su interior. Las geometrías están realizadas sobre los ejes X Y Z, donde los ejes X e Y representan las direcciones vertical y horizontal respectivamente, y el eje Z representa la dirección del flujo a lo largo del reactor tubular.

#### 5.1.1 Reactor tubular sin rascador

La imagen 5.1 muestra la malla realizada para el modelado de flujo en el reactor tubular sin el rascador.

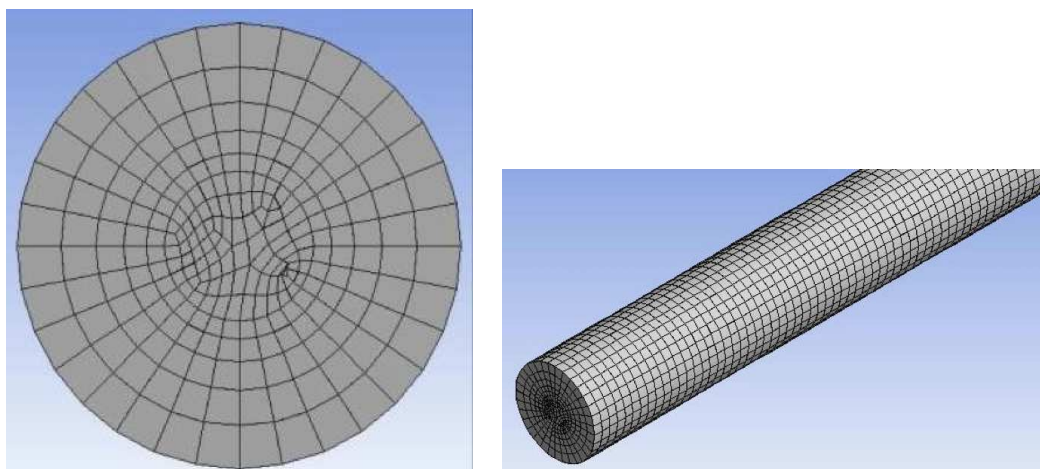
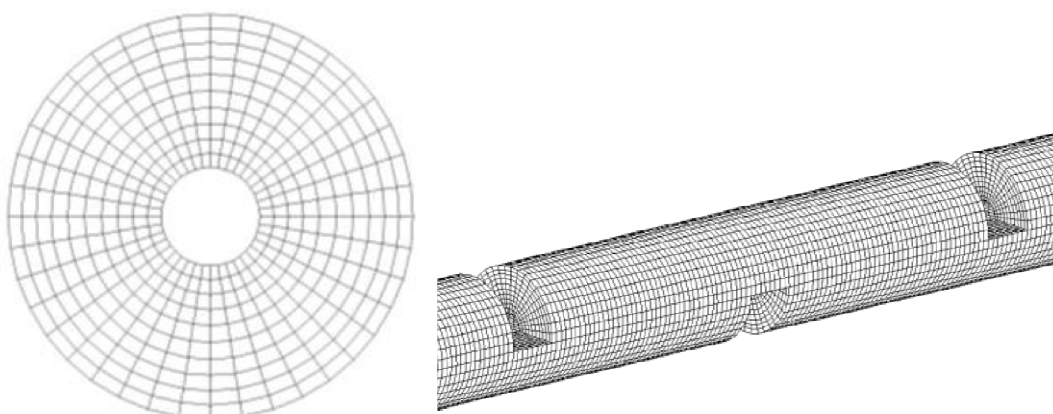


Imagen 5.1 Malla reactor tubular sin rascador.

#### 5.1.2 Reactor tubular con rascador en su interior

La imagen 5.2 muestra la malla realizada para el modelado del flujo en el interior del reactor tubular con el rascador en su interior.



**Imagen 5.2 Malla reactor tubular con rascador.**

## 5.2. Tipo de modelo

Se pueden usar tres tipos de modelo par modelar el flujo de dos fases:

- Fase discreta.
- Mezcla.
- Modelos eulerianos.

Con el fin de determinar que modelo se adapta mejor a las propiedades de los fluidos se debe considerar la carga de partículas. El modelo de fase discreta fue elegido para representar el flujo de dos fases, este es el modelo que mejor se adapta par situaciones donde el fluido tiene influencia sobre las partículas en terminos de turbulencia y resistencia, pero loas partículas tienen poca o ninguna incluencia sobre el fluido.

El modelo de fase discreta fue adaptado para molderlar partículas inertes que no experimentan interaccion con la fase continua. Las partículas se fijan para ser inyectadas uniformemente a traves de la entrada en la direccion normal de la cara. el diametro equivalente de las partículas, su velocidad y caudal se tomaron de los ensayos experimentales, podemos observarlos en la tabla 5.1:

	Pellets de madera	Paja molida
Diametro equivalente de particula	0.008	0.001
Velocidad (m/s)	53.11	6.28
Caudal total (kg/s)	0.508	0.011

El modelo viscoso se usa para diferenciar entre flujo laminar y flujo turbulento. Como ya establecimos anteriormente en este proyecto trabajamos en flujo turbulento.

### 5.3. Resultados

#### 5.3.1 Tubo liso

##### 5.3.1.1 Aire

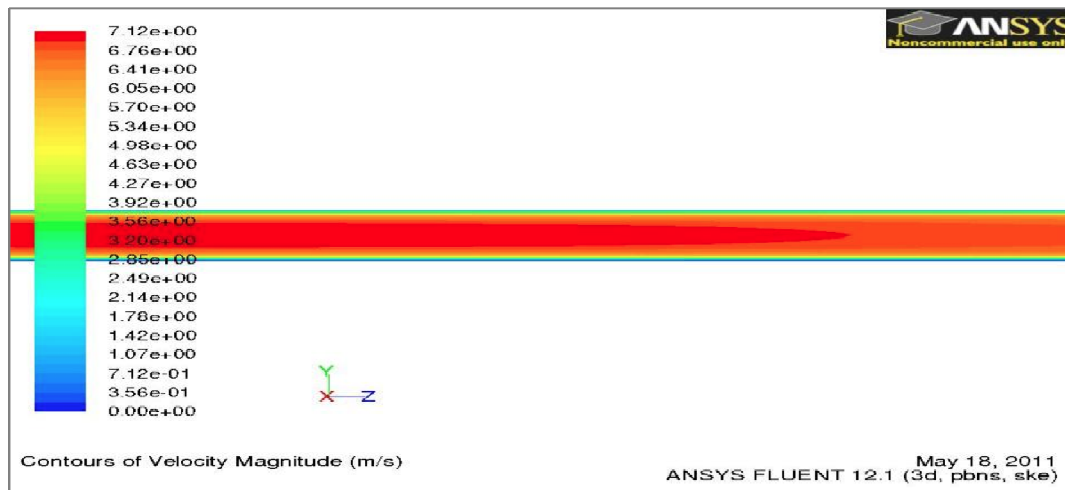


Imagen 5.3 curvas de velocidad de aire – tubo liso – plano yz

En todas las imágenes de modelado de flujo, el flujo del fluido va de izquierda a derecha, positivo el eje z

La imagen 5.3 muestra el modelo generado para el flujo de aire a través del reactor tubular sin rascador con respecto a la velocidad de flujo. El gráfico demuestra que la velocidad del caudal de aire decrece a lo largo de la longitud del tubo. La reducción en la velocidad del flujo es el resultado de la caída de presión experimentada en el interior del tubo. El modelo predice un flujo uniforme de aire sin turbulencias. Esto no concuerda con lo obtenido en los ensayos experimentales, donde pudimos observar un patrón de flujo helicoidal. Esta diferencia puede ser debida a la configuración de la instalación usada en los ensayos.

##### 5.3.1.2 Pellets de madera

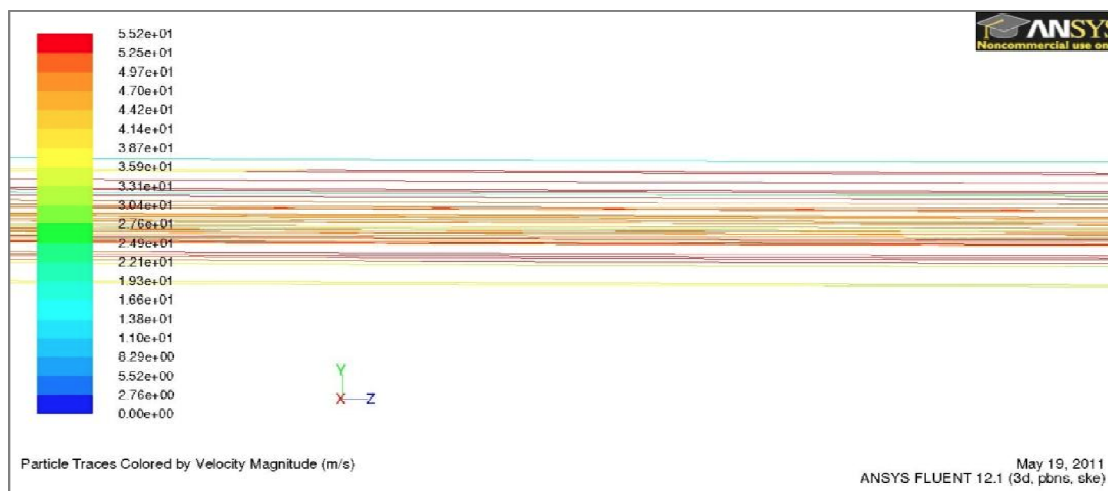
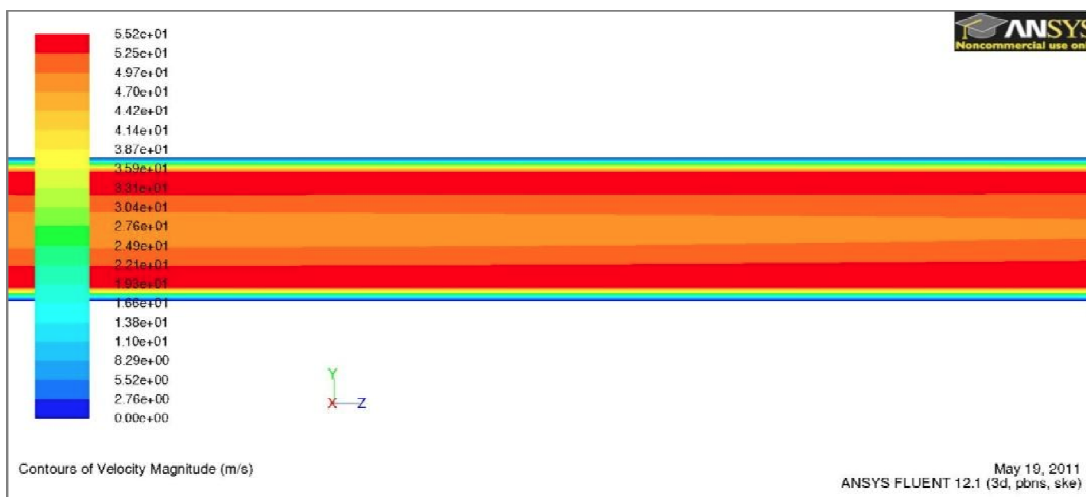


Imagen 5.4 camino de los pellets de madera en función de la velocidad – tubo liso – plano y z

la imagen 5.4 nos muestra la simulación del camino seguido por los pellets de madera. El modelo predice que los pellets de madera se moverán en el interior del tubo siguiendo un camino recto. Era de esperar que el efecto de la gravedad tuviera mas influencia en el camino seguido por las partículas. Esto puede ser debido al alto caudal de aire usado.

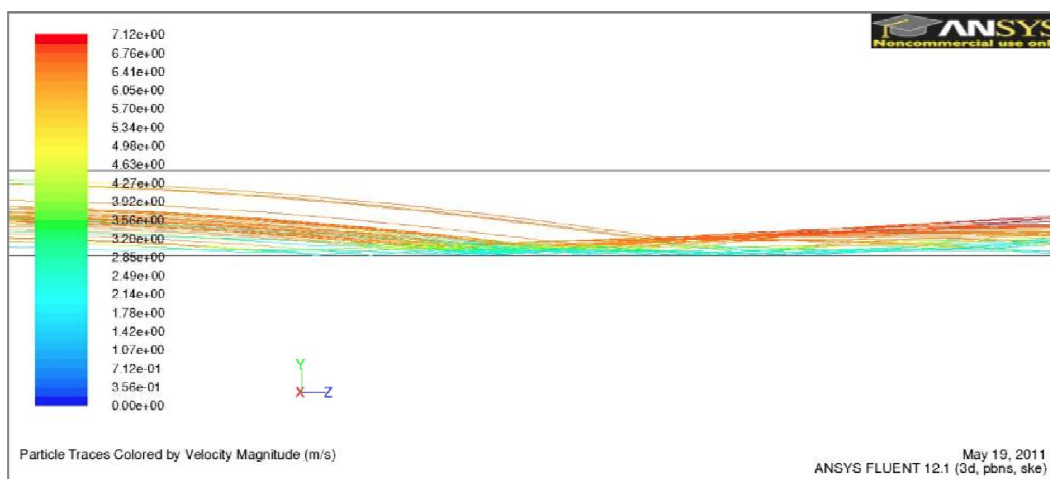


**Imagen 5.5 Contorno de velocidad de los pellets de madera – tubo liso – plano y z.**

La imagen 5.5 ilustra el contorno de velocidad a lo largo del plano y z generado para la mezcla aire/pellets de madera en el tubo liso.

El modelo predice un flujo de aire rápido en el centro del tubo. La velocidad de aire decrece conforme nos acercamos en las paredes del tubo.

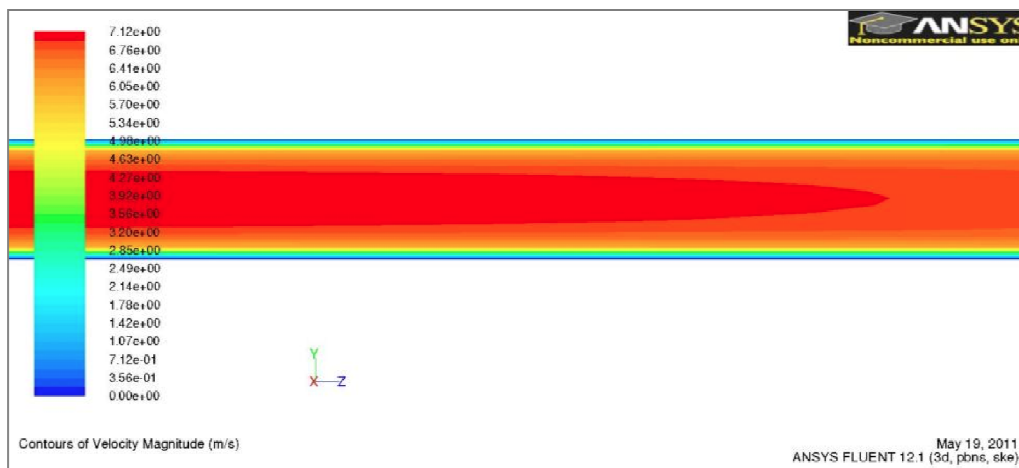
### 5.3.1.3 Paja molida



**Imagen 5.6 ruta de las partículas de paja molida en función de la velocidad plano y z**

La imagen 5.6 simula el camino seguido por las partículas de paja molida a lo largo del reactor tubular en el plano y z.

El caudal de aire usado con la biomasa en forma de paja molida es mas bajo que el usado con la biomasa como pellets de madera, por lo tanto, las partículas de paja molida se muestran mas afectadas por el efecto de la gravedad. El modelo predice que las partículas rebotaran a lo largo del fondo del tubo. Además, el modelo también predice un flujo mas lento de la biomasa en el fondo del tubo.

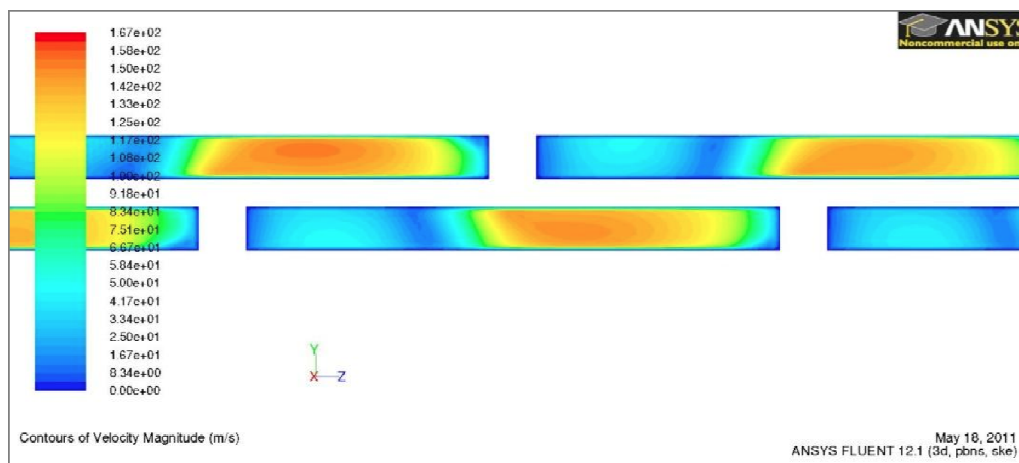


**Imagen5.7 contorno de velocidad de la paja molida tubo plano plano y z**

La imagen 5.7 nos muestra los contornos de velocidad a lo largo del plano y z generado para la mezcla de paja molida/aire en el tubo liso. De nuevo el modelo predice los mismos contornos de velocidad que para la mezcla aire/pellets de madera.

### 5.3.2 Rascador inmóvil

#### 5.3.2.1 Aire

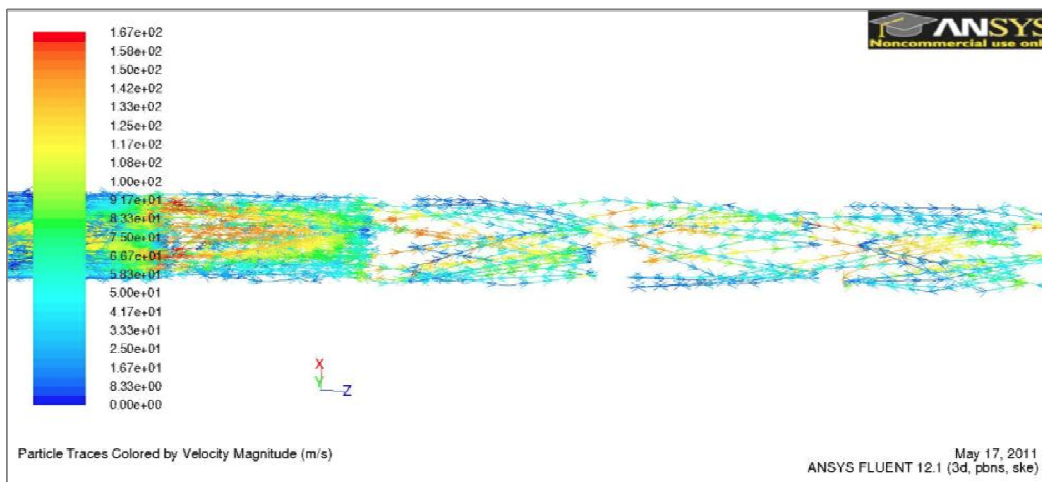


**Imagen 5.8 Contornos de velocidad de aire.**

La imagen 5.8 muestra el modelo generado para el flujo de aire en el interior del reactor tubular que contiene el rascador inmóvil con respecto a la velocidad del flujo. Podemos observar las regiones predichas de alta y baja velocidad y la estructura del rascador.

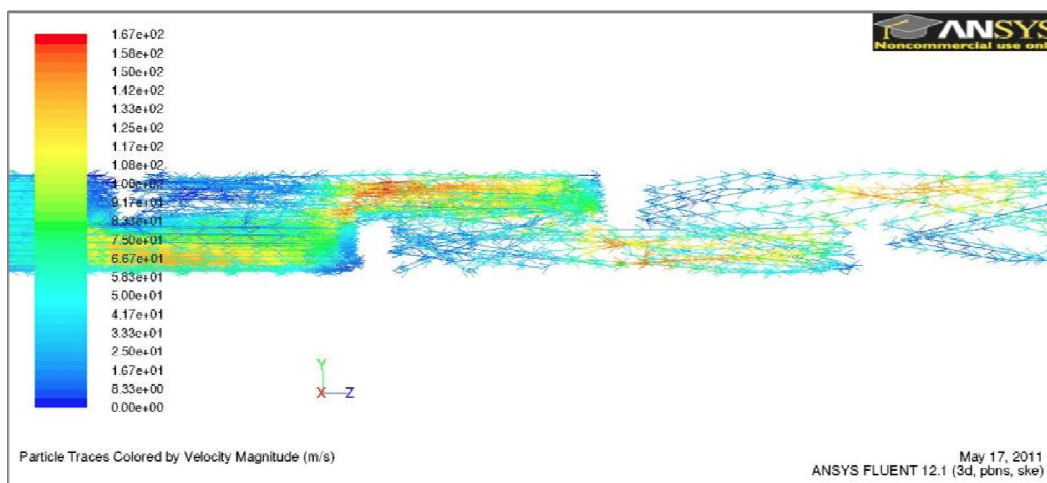
Esta predicción ofrece una razón de por que existe acumulación de biomasa frente a las palas del rascador, a baja velocidad, si no hay flujo en estas regiones.

### 5.3.2.2 Pellets de madera



**Imagen 5.9 Ruta de los pellets de madera en función de la velocidad – rascador inmóvil – plano x – z**

La imagen 5.9 muestra la simulación de los pellets de madera en el interior del reactor tubular en el plano x z con el rascador inmóvil. Podemos observar que las partículas siguen un camino helicoidal a lo largo del tubo. Esto concuerda con el patrón de flujo helicoidal de la biomasa en el interior del tubo observado en los ensayos experimentales.



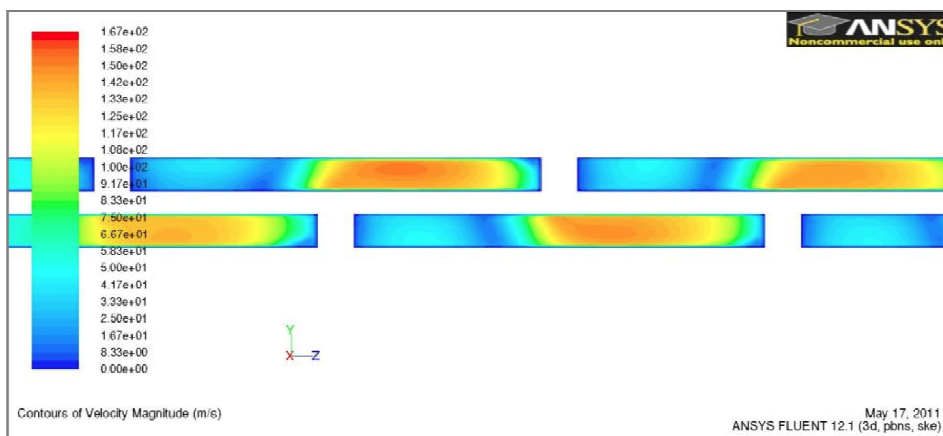
**Imagen 5.10 ruta de los pellets de madera en función de la velocidad – rascador inmóvil – plano yz**



La imagen 5.10 muestra la simulación de los pellets de madera en el interior del reactor tubular plano y  $z$ . podemos observar que algunas partículas siguen un camino helicoidal como el que observamos en el plano  $xz$ . Sin embargo, observamos que muchas de las partículas colisionan con las palas del rascador. Las partículas mas rápidas son aquellas que evitan el choque con las palas del rascador y las mas lentas aquellas que rebotan con las palas del rascador.

El reducido número de partículas observado después de las palas del rascador cuando lo comparamos antes del rascador, implica que hay una acumulación de partículas frente a las palas del rascador. Esto también confirma lo observado con los ensayos experimentales con el rascador inmóvil.

El modelo también describe adecuadamente la acumulación de biomasa en el fondo del reactor cuando este esta inmóvil.



**Imagen 5.11 Contornos de velocidad en el reactor tubular con rascador pellets de madera.**

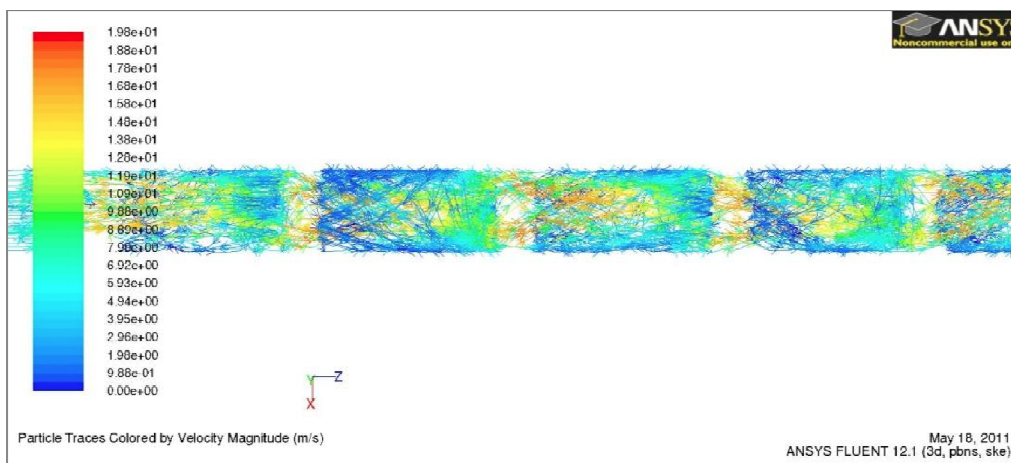
La imagen 5.11 muestra el contorno de velocidad de los pellets de madera en el interior del reactor tubular cuando el rascador esta estático en el plano  $y - z$  para la mezcla pellets de madera y aire.

El modelo predice que los contornos de velocidad para la mezcla de aire con pellets de madera son los mismos que para el aire solo.

Esto es debido a un modelo en fase discreta, el cual simula que las partículas no tienen efecto sobre el flujo del fluido.

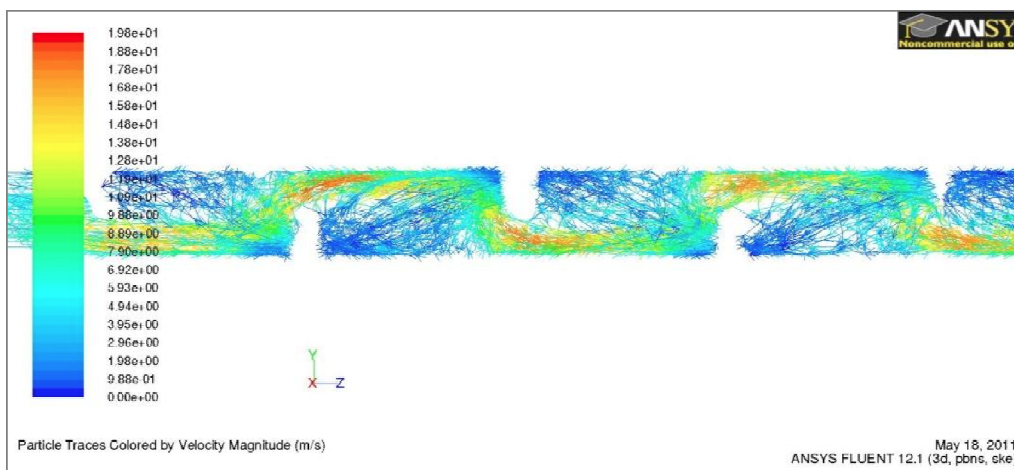


### 5.3.2.3 Paja molida

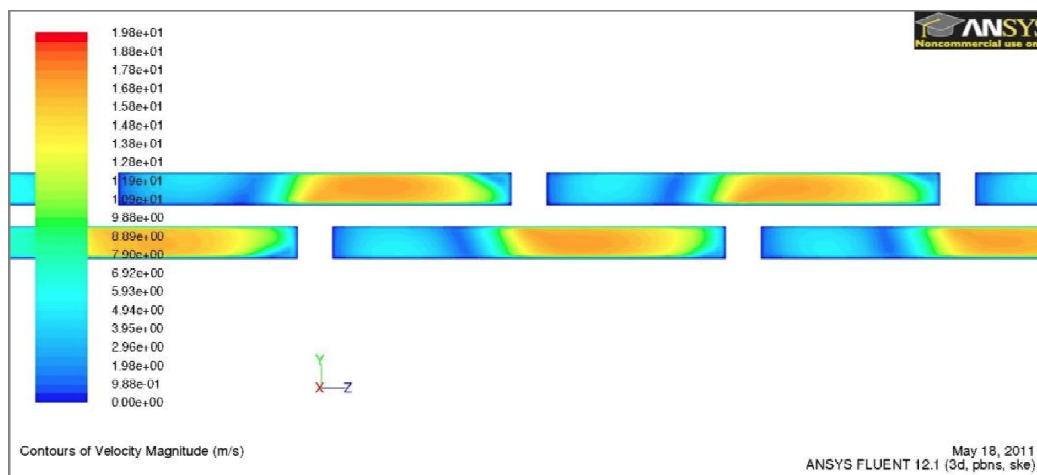


**Imagen 5.12 Rastreo de partículas de paja molida en función de la velocidad – rascador inmóvil – plano x z**

Los caminos seguidos por las partículas de paja molida se muestran en las imágenes 5.12 y 5.13. están coloreadas en función de la magnitud de la velocidad y muestra el plano x z (imagen 5.12) y el plano (y z ) imagen 5.13. de nuevo las partículas mas rápidas siguen un camino helicoidal a través de las palas del rascador, esto queda demostrado muy claro en el plano y z. Las zonas con un flujo bajo o sin flujo corresponden a la zona de acumulación de partículas observado en los ensayos experimentales como con el modelo generado para los pellets de madera. El modelo redirecciona las partículas de biomasa cuando chocan con las palas del rascador al igual que observamos en el modelo realizado para los pellets de madera.



**Imagen 5.13 rastreo de partículas de paja molida en función de la velocidad – rascador inmóvil – plano y z.**



**Imagen 5.14 Contornos de velocidad paja molida – rascador inmóvil plano y z**

La imagen 5.14 muestra los contornos de velocidad en el plano y z para la mezcla aire/paja molida en el interior del reactor tubular con el rascador inmóvil. Al igual que en el caso de los pellets de madera los contornos de velocidad son similares a los del aire solo.

El patrón de flujo generado por el modelo para el tubo con el rascador estático se corresponde con los resultados de los ensayos experimentales. El modelo predice el patrón de flujo helicoidal y la acumulación de biomasa después de la pala del rascador que da lugar a la fase a granel, como observamos en los ensayos. El modelo para el tubo liso sugiere que el patrón de flujo helicoidal que se observó con el modelo con el rascador es debido a la geometría del rascador en el tubo y no al flujo turbulento. De la misma forma el patrón de flujo helicoidal observado en los ensayos experimentales, en la entrada del tubo, es debido a la geometría de la entrada de aire a la instalación y a la geometría de la entrada de biomasa.

## 6. Conclusiones

Este proyecto ha ido orientado a investigar la conveniencia de usar el transporte neumático como método de alimentación de biomasa de forma continua para el procesamiento continuo de biomasa asistido con microondas.

Se incorporo al sistema un rascador con movimiento alternativo para confirmar su efecto sobre el flujo de biomasa. Hemos realizado una análisis de los patrones exhibidos por la biomasa para varias combinaciones de las siguientes variables:

- Tipo de biomasa.
- Caudal de aire.
- Caudal de biomasa.
- Velocidad del rascador.

Se tenía la intención de ampliar la investigación para analizar el flujo de biomasa a través de un tubo mas pequeño. Sin embargo, debido a problemas con la alimentación de biomasa no se pudo realizar. El modelado del sistema se ha llevado a cabo para permitir realizar comparaciones con los resultados experimentales.

El proyecto ha ido orientado hacia la mejora de nuestra comprensión de la utilización de transporte neumático para el flujo uniforme y continuo.

Podemos sacar las siguientes conclusiones de los ensayos realizados en el proyecto:

- Uno de los hallazgos más importantes obtenidos de este estudio es que el transporte neumático de la biomasa se tradujo en un flujo no uniforme.
- Sin el movimiento reciproco del rascador, la biomasa muestra dos fases, una fase a granel con un movimiento lento a través de la base del reactor y una fase suspendida con un movimiento rápido.
- Los ensayos realizados en este proyecto sugieren que los rascadores de movimiento alternativo mejorían la mezcla de la biomasa, así como la limpieza del interior del tubo.

Consecuentemente, se desarrolla una fase de transición entre la fase a granel y la fase suspendida, esto sucede en mayor medida con una mayor velocidad de rascado. Sin embargo, no hay ninguna evidencia de que el rascador tenga un efecto positivo en el flujo neto de biomasa. Sin embargo esto se puede considerar como positivo ya que no reduce el tiempo de residencia de la biomasa en el reactor y proporciona el rascado interior de la superficie interna del reactor tubular.

- Un caudal de aire bajo y altas velocidades del rascador se han identificado como las condiciones óptimas para los dos tipos de biomasa. Los caudales de aire óptimos son 90 kg/h para los pellets de madera y 10 kg/h para la paja molida, ambos caudales generan el mejor mezclado y 1 segundo es el valor óptimo para el periodo del rascador. Sin embargo, los tiempos de residencia, asociados con estas condiciones óptimas encontradas para el transporte neumático, son muy cortos, esto es una desventaja ya que daría lugar a reactores tubulares demasiado largos.
- La rotación del rascador añadido al movimiento alternativo mejora aun mas el mezclado de la biomasa.
- Para las condiciones ensayadas se ha observado una concentración de biomasa más baja de la esperada. Esto es debido a que se empleo un método de calculo inapropiado ya que no tenía en cuenta la fase a granel que se acumulaba en el fondo del reactor tubular.
- No se pudo conseguir una alimentación continua de paja molida debido a dos problemas:
  - Formación de un puente en la tolva de alimentación de biomasa.
  - Y adherencia de las partículas de paja molida a las paredes de la tolva de alimentación de biomasa.
- El sistema de modelado de flujo ayudo a validar los resultados obtenidos en los ensayos. Predice con exactitud como la gravedad y las palas del rascador afectan al flujo de biomasa en el interior del tubo. Específicamente a la acumulación de biomasa que aparece en el fondo del reactor tubular.

## 7. Recomendaciones para futuros trabajos

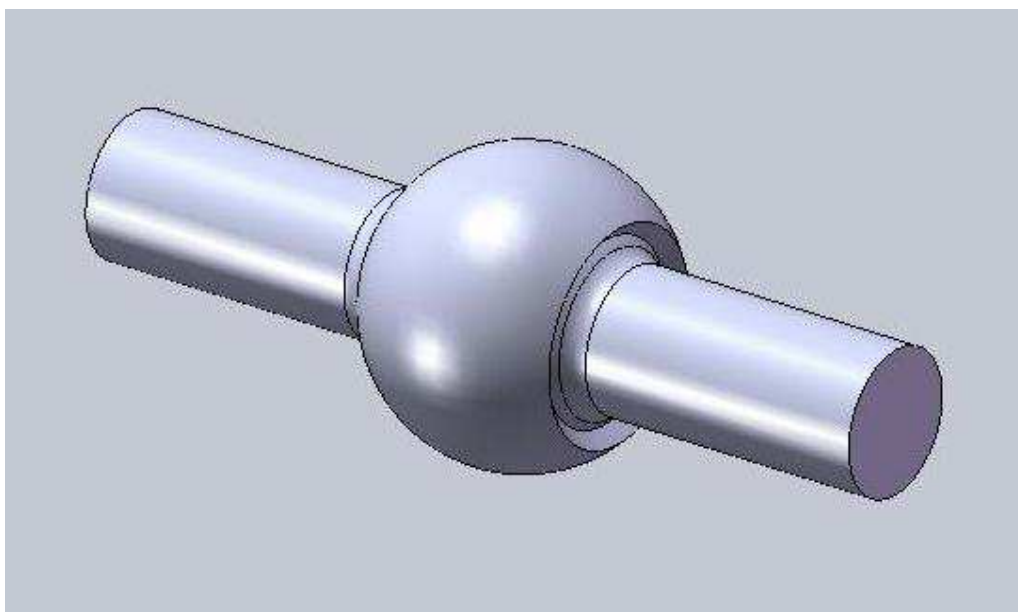
Atendiendo a los resultados obtenidos, podríamos afirmar que la rotación del rascador mejoraría el mezclado de biomasa en el interior del reactor tubular. Sería pues interesante investigar, de forma mas extensa, este efecto y la tecnología necesaria para conseguirlo.

Este proyecto, ha desarrollado una vía de ensayos mediante aportación de rotación al rascador. Los medios disponibles para la realización de esta rotación nos han obligado a la realización de una rotación manual, no pudiendo utilizar rotación automática en los mismos.

A continuación os mostramos un diseño de un mecanismo que nos proporcione en el rascador, además de movimiento alternativo, movimiento de rotación, más concretamente una rotación de 360 ° distribuida a lo largo del recorrido de una carrera de pistón hidráulico.

Para ello, utilizaremos, además del pistón hidráulico ya existente, los siguientes elementos:

→ Rotula mecánica (tal y como la mostrada en la imagen 7.1), la cual quedará fijada al pistón por uno de los extremos.

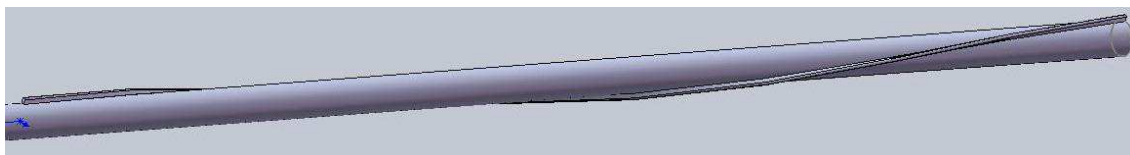


**Imagen 7.1 Rotula mecánica.**

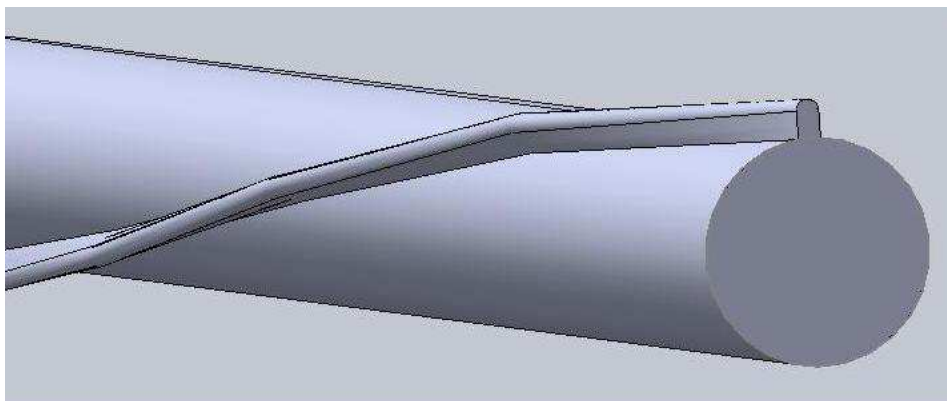
Esta pieza nos permitiría dotar al sistema, además del movimiento alternativo que nos proporciona el pistón, de la posibilidad de un movimiento de rotación.

→ Cilindro guía (tal y como muestra la figura 7.2) el cual tendrá un diámetro igual al diámetro de la varilla del rascador y longitud total tres veces la longitud total de la carrera del pistón hidráulico. En el primer tramo de la varilla, se coloca un hilo guía (ver figura 7.3), con el fin de facilitar el giro de 360° del cilindro.

Este cilindro quedaría unido a la rótula mecánica por un extremo y al rascador por el otro extremo.

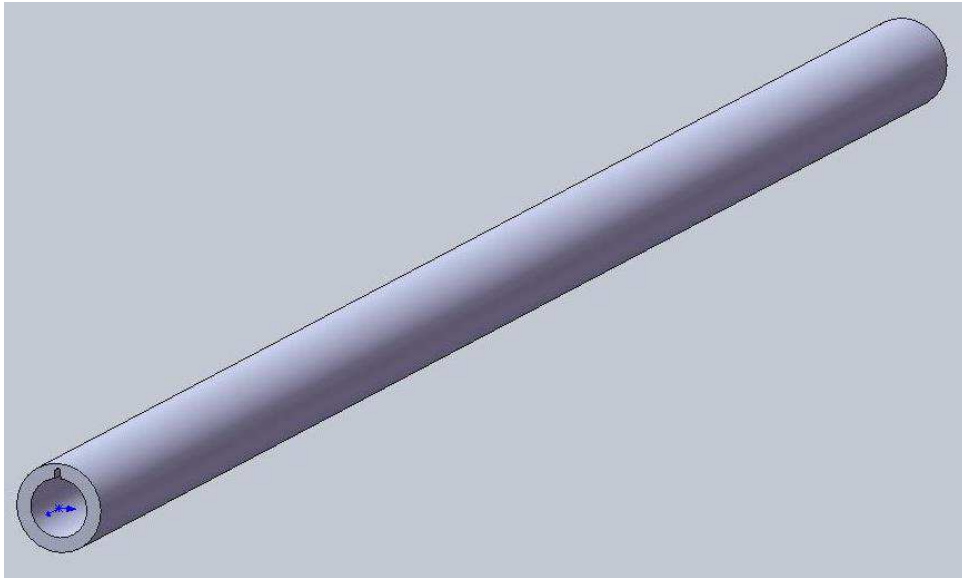


**Imagen 7.2 Cilindro guía**

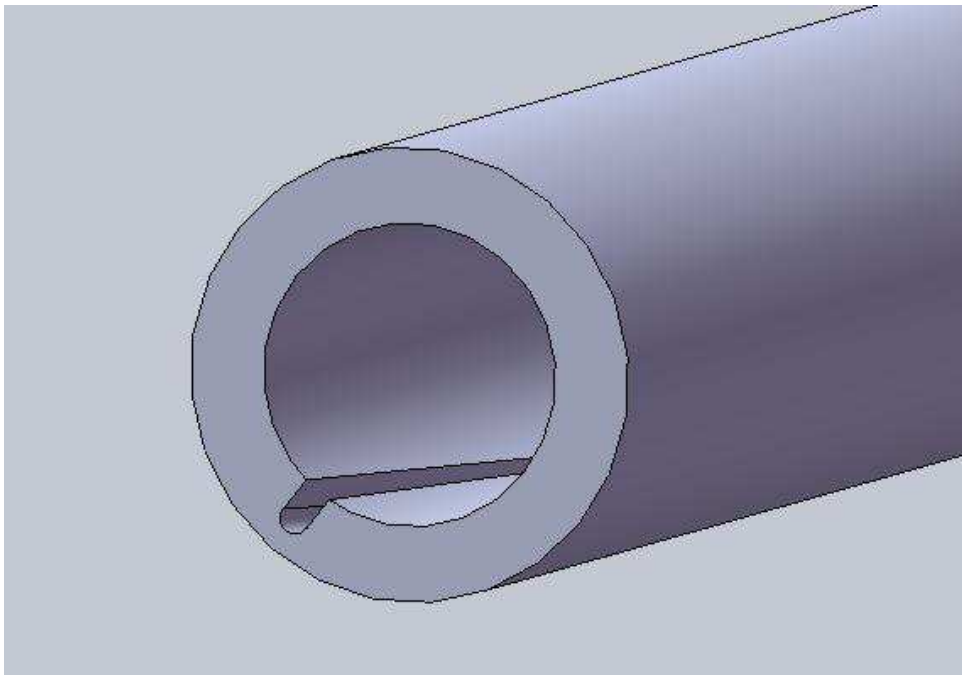


**Imagen 7.3 Detalle hilo guía**

→ Cilindro hueco o faja (mostrado en las figura 7.4 y 7.5), dentro del cual se situará el cilindro guía. Esta faja tendrá un diámetro interior igual al diámetro exterior de la varilla del rascador. El interior de esta faja tendría mecanizado un camino con giro a lo largo del recorrido de la misma, por el cual circularía el hilo guía, realizando así un giro de 360° a lo largo de la carrera del pistón.



**Imagen 7.4 Cilindro hueco**



**Imagen 7.5 Detalle mecanizado en el cilindro interior**

## 8. Referencias

Andrews, J. and Jelley, N. (2007) *Energy Science: Principles, Technologies and Impacts*. Oxford, UK: Oxford University Press

Biomass Energy Centre (2010) *What is Biomass?* Available at: [http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?\\_pageid=76,15049&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?_pageid=76,15049&_dad=portal&_schema=PORTAL)

Budarin, V., Clark, J. H., Lanigan, B. A. Shuttleworth, P., Breeden, S.W., Wilson, A. J., Macquarrie, D. J., Milkowski, K., Jones, J. Bridgeman, T. and Ross, a. (2009) *The Preparation of High-Grade Bio-Oils through the Controlled, Low Temperature Microwave Activation of Wheat Straw*, Bioresource Technology 100, pag. 6064 - 6068

Budarin, V.L., Clark, J. H., Lanigan, B. A. Shuttleworth, P. and Macquarrie, D. J. (2010) *Microwave Assisted Decomposition of Cellulose: A New Thermochemical Route for Biomass Exploitation*, Bioresource Technology 100, pag. 3776 – 3779

Calle, F. R., de Groot, P., hemstock, S.L. and Woods, J. (2007) *The Biomass Asessment Handbook: Bioenergy for a Sustainable Environment*. London, UK: Earthscan.

Carbon Trust (2011) *Resources – Conversion Factors*. Available at: <http://www.carbontrust.co.uk/cut-carbon-reduce-costs/calculate/carbon-footprinting/pages/conversion-factors.aspx>

Chemical Engineers' Resource Page (2006) *Pneumatic Conveying Design*. Available at: <http://www.cheresources.com/pnuconvey.shtml>

Clark, D. E., Folz, D. C. and West, J. K. (2000) *Processing Materials with Microwave Energy*, Materials Science and Engineering A, 287, (2), pp. 153 – 158.

Clark, J. H. (2007) *Green Chemistry for the Second Generation Biorefinery – Sustainable Chemical Manufacturing Based on Biomass*, Journal of Chemical Technology and Biotechnology 82, pp. 603 – 609.

Cui, H. and Grace, J. R. 2006) *Pneumatic Conveying of Biomass Particles: A Review*, China Particuology, 4, pp. 183 – 188.



- Cummer, K. R. and Brown, R. C. (2002) *Ancillary Equipment of Biomass Gasification*, Biomass and Bioenergy 23, pp. 113 – 128.
- Dai, J. and Grace, J. R. (2011) *Biomass Granular Screw Feeding: An Experimental Investigation*, Biomass and Bioenergy, 35, (2), pp. 942 – 955.
- De Goede, R. and De Jong, E. J. (1993) *Heat Transfer Properties of a Scraped-Surface Heat Exchange in the Turbulent Flow Regime*, Chemical Engineering Science, 48, (8), pp. 1393 – 1404.
- Frankel, M. (2011) *Simulations of Polymer Pellets Flow in a Pipe Bend*. Department of Chemical Engineering, Lund University.
- Gronnow, M. J., White, R. J., Clark, J. H. and Macquarrie, D. J. (2005) *Energy Efficiency in Chemical Reactions: A Comparative Study of Different Reaction Techniques*, Organic Process Research and Development, 9 (4), pp. 516 – 518.
- Martinez, D. S., Solano, J. P., Perez, J. y Viedma, a. (2010) *Proceedings of the 14 th International Heat Transfer Conference*. Washington, DC, USA
- Meier, D. and Faix, O. (1999) *State of the Art of Applied Fast Pyrolysis of Lignocellulosic Materials – A review*, Bioresource Technology 68, pp. 71 – 77.
- Mills, D. Jones, M. G. and Agarwal, V. K. (2004) *Handbook of Pneumatic Conveying Engineering*. New York, USA: Marcel Dekker.
- Miura, M., Kaga, H., Sakurai, A., Kakuchi, T. and Takahashi, K. (2004) *Rapid Pyrolysis of Wood Block by Microwave Heating*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 71, (1), pp. 187 – 199.
- Mohan, D., Pittman Jr, C. U. and Steele, P. H. (2006) *Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-Oil: A Critical Review*, Energy and Fuels, 20, (3), pp. 848 – 889.
- Nigam, P. S. and Sing, A. (2011) *Production of Liquid Biofuels from Renewable Resources*, Progress in Energy and Combustion Science 37, pp. 52 – 68.
- Robinson, J. P., Kingman, S. W., Barranco, R., Snape, C. E. and Al-Sayech, H. (2010) *Microwave Pyrolysis of Wood Pellets*, Industrial and Engineering Chemistry Research, 49, (2), pp. 459 – 463.

Salema, A. A. and Ani, F. N.(2011) *Microwave Induced Pyrolysis of Oil Palm Biomass*, Bioresource Technology, 102, pp. 3388 – 3395.

Singh, V. and Lo, S. (2009) *Predicting Pressure Drop in Pneumatics Conveying using the Discrete Element Modelling Approach*, Seventh International Conference on CFD in the Mineral and Process Industries. CSIRO, Melbourne, Australia, 9 – 11.12.09

Solano, J. P., Garcia, A., Vicente, P. G. and Viedma, A. (2010) *Flow Pattern Assessment in Tubes of Reciprocating Scraped Surface Heat Exchangers*, International Journal of Thermal sciences.

Strezov, V., Evans, T. J. and Nelson, P. F. (2006) *Carbonization of Biomass Fuels*, in Biomass and Bioenergy: New Research. New York, USA: Nova Science Publishers, Inc, pp. 91 – 123.

Tian, Y., Zuo, W., Ren, Z. and Chen, D. (2011) *Estimation of Biomass Fuels*, in Biomass and Bioenergy: New Research. New York, USA: Nova Science Publishers, Inc, pp. 91 – 123.

Wan, Y., Chen, P., Zhang, B., Yang, C., Liu, Y., Lin, X. and Ruan, R. (2009) *Microwave – Assisted Pyrolysis of Biomass: Catalysts to Improve Product Selectivity*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, (6, pp 161 – 167.

Wang, X., Chen, H., Luo, K., Shao, J. and Yang, H (2008) *The Influence of Microwave Drying on Biomass Pyrolysis*, Energy & fuels 22, pp. 67 – 74.

Zhang, J., Yuan, Z. and Wei, X. (2011) *An Automatic Shake Mechanism for the Biomass Pyrolysis Feeding System*, Powder Technology, 207, pp. 348 – 352.

Zheng, Y. and Liu, Q. (2011) *Review of Techniques for the Mass Flow Rate Measurement of Pneumatically Conveyed Solids*, Measurement, 44, pp. 589 – 604.

**APÉNDICE I: BIOMASA: PELLETS DE MADERA**

<b>Ensayo</b>	<b>Caudal de aire (kg/h)</b>	<b>Periodo del Rascador (s)</b>	<b>Válvula de Alimentación de Biomasa</b>
1	110	-	50% ABIERTA
1.2	110	-	50% ABIERTA
1.3	110	-	50% ABIERTA
2	110	-	100% ABIERTA
3	110	10	50% ABIERTA
3.2	110	10	50% ABIERTA
4	110	10	100% ABIERTA
5	110	5	50% ABIERTA
6	110	5	100% ABIERTA
7	135	-	50% ABIERTA
7.2	135	-	50% ABIERTA
8	135	-	100% ABIERTA
9	135	10	50% ABIERTA
10	135	10	100% ABIERTA
10.2	135	10	100% ABIERTA
11	135	5	50% ABIERTA
11.2	135	5	50% ABIERTA
12	135	5	100% ABIERTA
13	160	-	50% ABIERTA
13.2	160	-	50% ABIERTA
14	160	-	100% ABIERTA
15	160	10	50% ABIERTA
16	160	10	100% ABIERTA
17	160	5	50% ABIERTA
18	160	5	100% ABIERTA
19	90	-	50% ABIERTA
19.2	90	-	50% ABIERTA
20	90	-	100% ABIERTA
20.2	90	-	100% ABIERTA
21	90	10	50% ABIERTA
22	90	10	100% ABIERTA
22.2	90	10	100% ABIERTA
23	90	5	50% ABIERTA
23.2	90	5	50% ABIERTA
24	90	5	100% ABIERTA
48	90	2,5	100% ABIERTA
49	90	1	100% ABIERTA
50	90	2,5 (r)	100% ABIERTA
51	90	1	100% ABIERTA
56	40	2,5	100% ABIERTA
57	40	1	100% ABIERTA
58	40	2,5	100% ABIERTA

(r) Rascador con movimiento de rotación

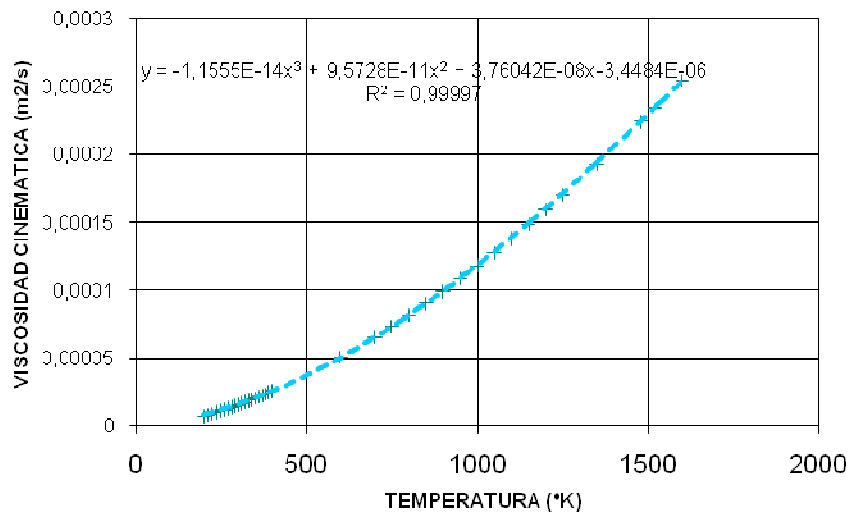
## APÉNDICE I.1 BIOMASA: PAJA MOLIDA

Ensayo	Caudal de aire (kg/h)	Periodo del Rascador (s)	Válvula de Alimentación de Biomasa
31	10	-	100% ABIERTA
32	10	10	100% ABIERTA
33	10	5	100% ABIERTA
34	20	-	100% ABIERTA
35	20	10	100% ABIERTA
36	20	5	100% ABIERTA
37	30	-	100% ABIERTA
38	30	10	100% ABIERTA
39	30	5	100% ABIERTA
43	10	5 (r)	100% ABIERTA
44	10	2.5	100% ABIERTA
45	10	1	100% ABIERTA
46	10	2.5	100% ABIERTA
47	10	1	100% ABIERTA

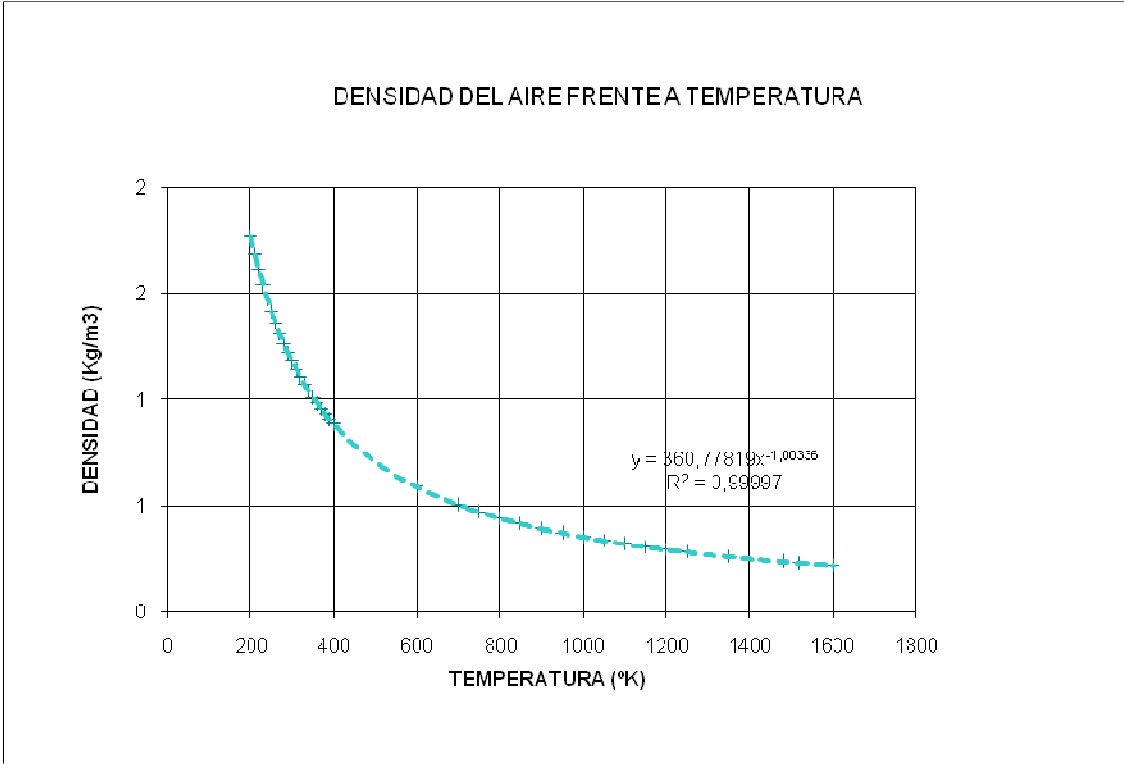
(r) Rascador con movimiento de rotación

## APÉNDICE II. VISCOSIDAD CINEMÁTICA DEL AIRE FRENTE A LA TEMPERATURA

### VISCOSIDAD CINEMATICA DEL AIRE FRENTE A TEMPERATURA



APÉNDICE III. DENSIDAD DEL AIRE FRENTE A LA TEMPERATURA



## APÉNDICE IV. NÚMERO REYNOLDS BIOMASA PELLETS DE MADERA

ENSAYO	m (kg/h)		T (K)	kg/m <sup>3</sup>	v (m <sup>2</sup> /s)	Re
19.2	90	92,19	291,91	1,21	1,540E-05	311834
20	90	85,69	292,16	1,21	1,542E-05	289671
20.2	90	97,47	292,15	1,21	1,542E-05	329500
21	90	92,55	292,43	1,21	1,545E-05	312654
22	90	98,45	292,75	1,21	1,547E-05	332327
22.2	90	93,57	292,02	1,21	1,541E-05	316417
23	90	89,16	293,18	1,21	1,551E-05	300653
23.2	90	88,93	291,18	1,22	1,533E-05	301344
24	90	88,18	290,21	1,22	1,524E-05	299516
48	90	85,9	291,83	1,21	1,539E-05	290614
49	90	93,76	292,08	1,21	1,541E-05	317013
50	90	92,8	293,16	1,21	1,551E-05	312943
51	90	86,72	293,64	1,21	1,556E-05	292100
					<b>MEDIA</b>	<b>308198,92</b>
1	110	108,58	290,74	1,22	1,529E-05	368324
1.2	110	110,5	291,57	1,21	1,537E-05	374078
1.3	110	107,56	290,27	1,22	1,525E-05	365289
2	110	105,05	291,4	1,21	1,535E-05	355776
3	110	112,11	292,15	1,21	1,542E-05	378991
3.2	110	107,42	291,33	1,21	1,535E-05	363865
4	110	109,14	292,25	1,21	1,543E-05	368861
5	110	113,02	292,34	1,21	1,544E-05	381890
6	110	115,59	292,4	1,21	1,544E-05	390517
					<b>MEDIA</b>	<b>371955</b>
7	135	133,1	291,9	1,21	1,540E-05	450223
7.2	135	133,1	291,9	1,21	1,540E-05	450223
8	135	137,9	292,06	1,21	1,541E-05	466277
9	135	139,78	292,02	1,21	1,541E-05	472680
10	135	131,41	290,59	1,22	1,528E-05	445936
10.2	135	132,18	291,46	1,21	1,536E-05	447592
11	135	127,73	291	1,22	1,532E-05	433012
11.2	135	136,59	291,78	1,21	1,539E-05	462164
12	135	136,5	292,34	1,21	1,544E-05	461229
					<b>MEDIA</b>	<b>454371</b>
13	160	165,67	292,28	1,21	1,543E-05	559875
13.2	160	167,6	292,32	1,21	1,544E-05	566342
14	160	158,05	288,09	1,23	1,505E-05	539664
15	160	161,55	289,21	1,22	1,515E-05	550084
16	160	166,73	289,71	1,22	1,520E-05	567021
17	160	158,26	290,1	1,22	1,523E-05	537698
18	160	163,74	290,34	1,22	1,526E-05	555988
					<b>MEDIA</b>	<b>553810</b>

## APÉNDICE V. NÚMERO REYNOLDS BIOMASA PAJA MOLIDA

ENSAYO	m (kg/h)		T (K)	kg/m <sup>3</sup>	v (m <sup>2</sup> /s)	Re
31	10	12,34	292,56	1,21	1,546E-05	41674,07
32	10	13,31	294,23	1,2	1,561E-05	44768,21
33	10	11,25	295,16	1,2	1,569E-05	37754,67
43	10	10,04	296,84	1,19	1,585E-05	33558,6
44	10	11,32	295,39	1,2	1,571E-05	37968,59
45	10	10,98	295,12	1,2	1,569E-05	36852,1
46	10	11	296,15	1,2	1,578E-05	36828,08
47	10	12,29	292,68	1,21	1,547E-05	41493,09
					<b>MEDIA</b>	<b>38862,17</b>
34	20	17,95	294,51	1,2	1,563E-05	60334,06
35	20	19,96	294,71	1,2	1,565E-05	67057,79
36	20	20,13	294,7	1,2	1,565E-05	67630,55
					<b>MEDIA</b>	<b>65007,47</b>
37	30	30,88	294,87	1,2	1,567E-05	103704,73
38	30	28,78	294,74	1,2	1,566E-05	96682,54
39	30	28,24	295,14	1,2	1,569E-05	94777,16
					<b>MEDIA</b>	<b>98388,14</b>



**APÉNDICE VI. BIOMASA: PELLETS DE MADERA**

<b>Ensayo</b>	<b>Caudal de aire (kg/h)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Masa de biomasa</b>	<b>Caudal de biomasa (kg/s)</b>
1	108,58	44,68	8,458	0,189
1.2	110,5	34,88	5,702	0,163
1.3	107,56	53,09	9,282	0,175
2	105,05	33,5	5,518	0,165
3	112,11	41,78	2,154	0,052
3.2	107,42	33,64	3,304	0,098
4	109,14	31,03	5,016	0,162
5	113,02	32,68	3,08	0,094
6	115,59	36,85	8,788	0,239
7	133,1	47,5	5,266	0,111
7.2	133,1	39,9	4,346	0,109
8	137,9	32,97	9,196	0,279
9	139,78	42,5	9,868	0,232
10	131,41	40,6	11,028	0,272
10.2	132,18	34,94	6,802	0,195
11	127,73	36,78	2,968	0,081
11.2	136,59	41,59	3,688	0,089
12	136,5	37,35	5,432	0,145
13	165,67	53,72	6,692	0,125
13.2	167,6	43,6	3,774	0,087
14	158,05	35,25	11,086	0,314
15	161,55	39,16	8,294	0,212
16	166,73	34,31	9,374	0,273
17	158,26	35,47	8,874	0,25
18	163,74	33,44	10,328	0,309
19.2	92,19	39,34	6,214	0,158
20	85,69	25,09	7,84	0,312
20.2	97,47	20,65	7,938	0,384
21	92,55	37,16	4,894	0,132
22	98,45	20,97	8,294	0,396
22.2	93,57	21,48	7,736	0,36
23	89,16	35,47	2,218	0,063
23.2	88,93	31,18	5,678	0,182
24	88,18	20,58	7,578	0,368
48	85,9	18,09	7,4	0,409
49	93,76	14,62	7,43	0,508
50	92,8	15,02	8,084	0,532
51	86,72	10,86	5,952	0,548
56	24,87	53,09	2,106	0,04
57	42,24	34,17	5,724	0,168
58	35,27	33,98	2,346	0,069

## APÉNDICE VI.1 BIOMASA: PAJA MOLIDA

Ensayo	Caudal de aire (kg/h)	Tiempo (s)	Masa de biomasa	Caudal de biomasa (kg/s)	Masa de biomasa (kg)
31	12,34	297,03	0,754	0,002	0,542
32	13,31	230,71	0,688	0,0006	0,146
33	11,25	210,81	0,708	0,0008	0,172
34	17,95	131,67	0,742	0,002	0,228
35	19,96	182,1	0,608	0,002	0,308
36	20,13	140,27	0,796	0,002	0,272
37	30,88	84,35	0,592	0,008	0,698
38	28,78	87,02	0,584	0,007	0,594
43	10,04	60,68	0,704	0,002	0,132
44	11,32	106,24	0,826	0,001	0,092
45	10,98	118,06	0,818	0,001	0,116
46	11	55,41	0,644	0,005	0,266
47	12,29	60,98	0,264	0,011	0,652

**APÉNDICE VII: FRACCIÓN DE VOLUMEN DE BIOMASA PELLET DE MADERA**

Ensayo	caudal másico de aire	densidad del aire	caudal volumétrico de aire	caudal de biomasa	caudal volumétrico de biomasa	fracción en volumen de biomasa
1	0,302	1,217	0,248	0,189	0,00036	0,0015
1.2	0,307	1,214	0,253	0,163	0,00031	0,0012
1.3	0,299	1,219	0,245	0,175	0,00034	0,0014
2	0,292	1,215	0,24	0,165	0,00032	0,0013
3	0,311	1,212	0,257	0,052	0,0001	0,0004
3.2	0,298	1,215	0,246	0,098	0,00019	0,0008
4	0,303	1,211	0,25	0,162	0,00031	0,0012
5	0,314	1,211	0,259	0,094	0,00018	0,0007
6	0,321	1,211	0,265	0,239	0,00046	0,0017
7	0,37	1,213	0,305	0,111	0,00021	0,0007
7.2	0,37	1,213	0,305	0,109	0,00021	0,0007
8	0,383	1,212	0,316	0,279	0,00054	0,0017
9	0,388	1,212	0,32	0,232	0,00045	0,0014
10	0,365	1,218	0,3	0,272	0,00052	0,0017
10.2	0,367	1,214	0,302	0,195	0,00037	0,0012
11	0,355	1,216	0,292	0,081	0,00016	0,0005
11.2	0,379	1,213	0,313	0,089	0,00017	0,0005
12	0,379	1,211	0,313	0,145	0,00028	0,0009
13	0,46	1,211	0,38	0,125	0,00024	0,0006
13.2	0,466	1,211	0,384	0,087	0,00017	0,0004
14	0,439	1,229	0,357	0,314	0,0006	0,0017
15	0,449	1,224	0,367	0,212	0,00041	0,0011
16	0,463	1,222	0,379	0,273	0,00053	0,0014
17	0,44	1,22	0,36	0,25	0,00048	0,0013
18	0,455	1,219	0,373	0,309	0,00059	0,0016
19.2	0,256	1,213	0,211	0,158	0,0003	0,0014
20	0,238	1,212	0,196	0,312	0,0006	0,003
20.2	0,271	1,212	0,223	0,384	0,00074	0,0033
21	0,257	1,21	0,212	0,132	0,00025	0,0012
22	0,273	1,209	0,226	0,396	0,00076	0,0034
22.2	0,26	1,212	0,214	0,36	0,00069	0,0032
23	0,248	1,207	0,205	0,063	0,00012	0,0006
23.2	0,247	1,216	0,203	0,182	0,00035	0,0017
24	0,245	1,22	0,201	0,368	0,00071	0,0035
48	0,239	1,213	0,197	0,409	0,00079	0,004
49	0,26	1,212	0,215	0,508	0,00098	0,0045
50	0,258	1,207	0,214	0,538	0,00104	0,0048
51	0,241	1,205	0,2	0,548	0,00105	0,0052
56	0,069	1,201	0,058	0,04	0,00008	0,0013
57	0,117	1,203	0,098	0,168	0,00032	0,0033
58	0,098	1,203	0,081	0,069	0,00013	0,0016

**APÉNDICE VIII: FRACCIÓN DE VOLUMEN DE BIOMASA PAJA MOJADA**

<b>Ensayo</b>	<b>caudal másico de aire</b>	<b>densidad del aire</b>	<b>caudal volumétrico de aire</b>	<b>caudal de biomasa</b>	<b>caudal volumétrico de biomasa</b>	<b>fracción en volumen de biomasa</b>
<b>31</b>	0,034	1,21	0,028	0,0018	0,0000156	0,00055
<b>32</b>	0,037	1,203	0,031	0,0006	0,00000541	0,00018
<b>33</b>	0,031	1,199	0,026	0,0008	0,00000697	0,00027
<b>34</b>	0,05	1,202	0,041	0,0017	0,0000148	0,00036
<b>35</b>	0,055	1,201	0,046	0,0017	0,0000145	0,00031
<b>36</b>	0,056	1,201	0,047	0,0019	0,0000166	0,00036
<b>37</b>	0,086	1,2	0,071	0,0083	0,0000707	0,00099
<b>38</b>	0,08	1,201	0,067	0,0068	0,0000583	0,00088
<b>43</b>	0,028	1,192	0,023	0,0022	0,0000186	0,00079
<b>44</b>	0,031	1,198	0,026	0,0009	0,0000074	0,00028
<b>45</b>	0,031	1,199	0,025	0,001	0,0000084	0,00033
<b>46</b>	0,031	1,195	0,026	0,0048	0,000041	0,0016
<b>47</b>	0,034	1,209	0,028	0,0107	0,0000914	0,00323

**APÉNDICE IX: CONSUMO DE ENERGIA BIOMASA PELLETS DE MADERA**

ENSAYO	m (kg/h)	(kg/m <sup>3</sup> )	Apa (bar)	energía a (W)	At (s)	energía rascador favor de corriente (W)	energía rascador a contra corriente (W)	energía rascador (W)	energía (W)
1	108,6	1,217	0,442	1094	-	-	-	-	1094
1.2	110,5	1,214	0,425	1074,6	-	-	-	-	1074,6
2	105,1	1,215	0,373	894,9	-	-	-	-	894,9
3	112,1	1,212	0,425	1091	11,52	8,3	11,2	9,8	1100,8
4	109,1	1,211	0,368	920,3	11,53	9,4	13,2	11,3	931,6
5	113	1,211	0,416	1079,6	5,73	23,6	29,3	26,4	1106,1
6	115,6	1,211	0,459	1216,8	5,74	25,4	34,6	30,1	1246,9
7	133,1	1,213	0,431	1314,1	-	-	-	-	1314,1
7.2	133,1	1,213	0,551	1679,5	-	-	-	-	1679,5
8	137,9	1,212	0,43	1359,1	-	-	-	-	1359,1
9	139,8	1,212	0,627	2009,2	11,53	9,5	14,7	12,1	2021,3
10	131,4	1,218	0,546	1637	11,52	10,2	13,2	11,7	1648,7
10.2	132,2	1,214	0,546	1650	11,53	10,2	13,5	11,9	1661,9
11	127,7	1,216	0,532	1550,7	5,73	25,5	32,5	29,1	1579,8
11.2	136,6	1,213	0,601	1878,1	5,73	25,7	33	29,4	1907,5
12	136,5	1,211	0,594	1859	5,74	26,1	33,9	30,1	1889,1
13	165,7	1,211	0,501	1903	-	-	-	-	1903
13.2	167,6	1,211	0,715	2749	-	-	-	-	2749
14	158,1	1,229	0,758	2707,3	-	-	-	-	2707,3
15	161,6	1,224	0,728	2670,3	11,52	8,8	13,6	11,2	2681,5
16	166,7	1,222	0,797	3020	11,52	8,4	9,1	8,7	3028,8
17	158,3	1,22	0,8	2883,7	5,75	24,2	34,8	29,5	2913,2
18	163,7	1,219	0,796	2970,1	5,74	24,8	36	30,4	3000,6
19.2	92,2	1,213	0,302	637	-	-	-	-	637
20	85,7	1,212	0,288	565,6	-	-	-	-	565,6
20.2	97,5	1,212	0,348	777,2	-	-	-	-	777,2
21	92,5	1,21	0,305	648,5	11,52	8,9	12,1	10,5	659
22	98,5	1,209	0,371	839,8	11,53	8,9	14,3	11,6	851,4
22.2	93,6	1,212	0,337	723,6	11,53	8,1	11,7	9,9	733,5
23	89,2	1,207	0,276	566	5,74	25,2	31,9	28,6	594,6
23.2	88,9	1,216	0,303	614,8	5,75	24,4	32,3	28,3	643,1
24	88,2	1,22	0,326	655,3	5,75	23,4	36,3	29,7	684,9
48	85,9	1,213	0,292	575,3	2,49	56	63	59,6	634,9
48.2	85,9	1,213	0,271	533,4	2,49	53,9	63,4	58,7	592,1
49	93,8	1,212	0,343	737,1	1,12	125,2	151,8	138,1	875,2
50	92,8	1,207	0,284	607,1	2,49	52,2	65,2	58,6	665,7
50.2	92,8	1,207	0,316	674,3	2,49	54,8	63,1	59	733,2
51	86,7	1,205	0,283	565,6	1,12	125,2	147	135,8	701,4
56	24,9	1,201	0,051	29,2	2,38	39,9	44,7	42,4	71,6
57	42,2	1,203	0,084	81,8	1,08	101,8	112,3	107,2	189
58	35,3	1,203	0,098	80,1	2,46	59,7	59	59,3	139,4

**APÉNDICE X: CONSUMO DE ENERGIA BIOMASA PAJA MOLIDA**

ENSAYO	m (kg/h)	(kg/m3)	Apa (bar)	energía a (W)	At (s)	energía rascador favor de corriente (W)	energía rascador a contra corriente (W)	energía rascador (W)	energía (W)
31	12,3	1,21	0,012	3,3	-	-	-	-	3,3
32	13,3	1,203	0,013	4,1	11,52	9,7	12,4	11,1	15,2
33	11,3	1,199	0,012	3,1	5,73	25,4	32,9	29,2	32,3
34	17,9	1,202	0,013	5,3	-	-	-	-	5,3
35	20	1,201	0,015	6,9	11,53	9,9	12,7	11,3	18,2
36	20,1	1,201	0,016	7,6	5,72	25,6	33,3	29,5	37,1
37	30,9	1,2	0,036	25,6	-	-	-	-	25,6
38	28,8	1,201	0,03	19,6	11,53	8,8	12	10,4	30
39	28,2	1,199	0,032	20,8	5,72	23,9	32,3	28,1	49
43	10	1,192	0,015	3,5	5,74	28	36,3	32,2	35,7
44	11,3	1,198	0,01	2,6	2,52	52	62,2	57,2	59,8
45	11	1,199	0,009	2,3	1,1	128	140,1	134,2	136,5
46	11	1,195	0,011	2,8	2,49	54,6	60,1	57,4	60,2
47	12,3	1,209	0,011	3	1,11	139,4	134,8	136,9	140

**APÉNDICE XI: CO2 EQUIVALENTE BIOMASA: PELLETS DE MADERA**

<b>Ensayo</b>	<b>energía rascador (W)</b>	<b>CO2 Equivalente</b>
<b>1</b>	1094	4771,77
<b>1.2</b>	1074,6	4687,15
<b>2</b>	894,9	3903,34
<b>3</b>	1100,8	4801,43
<b>4</b>	931,6	4063,42
<b>5</b>	1106,1	4824,54
<b>6</b>	1246,9	5438,68
<b>7</b>	1314,1	5731,79
<b>7.2</b>	1679,5	7325,58
<b>8</b>	1359,1	5928,07
<b>9</b>	2021,3	8816,43
<b>10</b>	1648,7	7191,23
<b>10.2</b>	1661,9	7248,81
<b>11</b>	1579,8	6890,71
<b>11.2</b>	1907,5	8320,06
<b>12</b>	1889,1	8239,8
<b>13</b>	1903	8300,43
<b>13.2</b>	2749	11990,43
<b>14</b>	2707,3	11808,59
<b>15</b>	2681,5	11696,06
<b>16</b>	3028,8	13210,9
<b>17</b>	2913,2	12706,68
<b>18</b>	3000,6	13087,9
<b>19</b>	574,7	2506,7
<b>19.2</b>	637	2778,44
<b>20</b>	565,6	2467,01
<b>20.2</b>	777,2	3389,96
<b>21</b>	659	2874,4
<b>22</b>	851,4	3713,6
<b>22.2</b>	733,5	3199,35
<b>23</b>	594,6	2593,5
<b>23.2</b>	643,1	2805,05
<b>24</b>	684,9	2987,37
<b>48</b>	634,9	2769,28
<b>48,2</b>	592,1	2582,6
<b>49</b>	875,2	3817,41
<b>50</b>	665,7	2903,62
<b>50.2</b>	733,2	3198,04
<b>51</b>	701,4	3059,34
<b>56</b>	71,6	312,3
<b>57</b>	189	824,37
<b>58</b>	139,4	608,03

**APÉNDICE XI.1: CO2 EQUIVALENTE BIOMASA: PAJA MOJADA**

<b>Ensayo</b>	<b>energía rascador (W)</b>	<b>CO2 Equivalente</b>
<b>31</b>	3,3	14,4
<b>32</b>	15,2	66,3
<b>33</b>	32,3	140,9
<b>34</b>	5,3	23,1
<b>35</b>	18,2	79,4
<b>36</b>	37,1	161,8
<b>37</b>	25,6	111,7
<b>38</b>	30	130,9
<b>39</b>	49	213,7
<b>43</b>	35,7	155,7
<b>44</b>	59,8	260,8
<b>45</b>	136,5	595,4
<b>46</b>	60,2	262,6